INVESTIGACION y CIENCIA

MINERIA Y COMERCIO EN LA AMERICA PRECOLOMBIANA

TELEVISION DE ALTA DEFINICION

BIOQUIMICA Y CITOLOGIA CONTRA EL CANCER

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



TRAMPA DE LASER

ABRIL 1992
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

INVESTIGACION y CIENCIA
Abril de 1992 Número 187

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan García Targa: *La turquesa en la América prehispánica*; J. Carlos Carracedo: *Volcanes de lodo de las Marianas*; Esteban Santiago: *Invasión de células cancerosas y metástasis*; Esperanza Fernández: *Mamíferos de la isla de Europa*; Ramón Pascual: *Trampa de láser para partículas neutras*; Carlos Castrodeza: *Nicolai V. Timoféeff-Ressovsky*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

J. M. V. Martínez, E. Ballesteros, Juan Ortín y Susana de la Luna, J. M. García de la Mora, J. E. Llebot, J.-D. Ros, Ana Mª García y Jesús Pineda

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Esteban Rodríguez Ocaña, Angel Romo, Luis Alonso y Javier de Lorenzo

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8-10	Lee Boltin/Trustees of the British Museum
11	Laurie Grace
12	Lee Boltin/Trustees of the British Museum
13	Joe LeMonnier
14	Lee Boltin/Trustees of the Bristish Museum
16-17	Gerard Fryer, Universidad de Hawai
18	Ian Worpole
19	Gerard Fryer
20	Patricia Fryer (*arriba*), Gerard Fryer (*abajo*)
21-22	Patricia Fryer
25	Peter Bendt/Custom Medical Stock Photo
26-27	Dana Burns-Pizer
28	Dana Burns-Pizer (*arriba*), David Montrose/Custom Medical Stock Photo (*abajo, izquierda*), Lance A. Liotta (*abajo, derecha*)
30	Dana Burns-Pizer
31	Jason Küffer
49	Patricia J. Wynne (*arriba*), Museo de Historia Natural de Senckenberg, Frankfurt am Main (*abajo*)
50	Angelika Helfricht
51	Museo Senckenberg
52	Museo Senckenberg (*arriba y centro*), Museo estatal de Historia Natural, Karlsruhe (*abajo*)
53	Museo Senckenberg
54	Douglas L. Peck
56-59	George Retseck
60	Arthur Ashkin, Laboratorios AT&T Bell
63	Cortesía de Bruce Edgar
64-68	Sergio Moreno y Silvia Nuere
71	Cortesía de Vassily Babkoff y Elena Sakanyan
72-73	*Kadr* (*a*), *Genetics* (*b*), vol. 55, n.º 1, 1967, Archivo Bettmann (*c*), cortesía de Marguerite Vogt (*d*), AP/Wide World Photos (*e, f, g*)
74-75	Cortesía de los Archivos del Instituto de Tecnología de California (*h, i*), Sovfoto/Eastfoto (*k*), cortesía de Vassily Babkoff y Elena Sakanyan (*m*), Sovfoto/Eastfoto (*l*), cortesía de Vassily Babkoff y Elena Sakanyan (*n*)
78-79	Steve Murez/Black Star
80	Ian Worpole
81	Charles P. Sandbank, cortesía de John Wiley & Sons Ltd
82-83	Ian Worpole
84	Johnny Johnson
85-86	Steve Murez/Black Star
94-96	Andrew Christie



LA PORTADA ilustra seis haces lasèricos que se utilizan para enfriar átomos hasta temperaturas próximas al cero absoluto. Los haces forman parte de un complicado ingenio para medir con la máxima precisión los estados energéticos de los átomos. La investigación en ese campo ha demostrado la viabilidad de un reloj atómico mucho mejor, amén de conducir a unas mediciones finísimas de la fuerza de la gravedad. Las técnicas fundadas en el láser se han aplicado para manipular moléculas, células y otros objetos microscópicos (véase "Trampa de láser para partículas neutras" por Steven Chu, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

Scientific American: «Dudamos que ninguna publicación acreditada haya violado a sabiendas el código de honor adoptado por la mayoría de las redacciones mucho antes del inicio de las hostilidades contra Estados Unidos. En lo que atañe a esta revista, en nuestras páginas no han aparecido ninguna ilustración ni textos referentes a nuestros esfuerzos en materia de defensa anteriores a Pearl Harbour, o a nuestras actividades bélicas tras esa fecha, que no hayan sido aprobados por el personal competente del Ejército, la Armada o la Infantería de Marina.»

«Los números de octanos son cifras engañosas; no significan lo que parecen expresar porque la potencia crece mucho más deprisa que los números. Así, al triptano, cuyo rendimiento energético es un 50 por ciento superior al de un combustible de 100 octanos, le correspondería realmente un número de octanos de 110. Lo más que hoy Hitler puede conseguir es un combustible de 87 octanos cuyo rendimiento es un 30 por ciento menor que el de los combustibles de 100 octanos. Esto implica que los aviones de Hitler deben resignarse con velocidades menores, techos más bajos, menos autonomía y tiempos de subida mayores hasta una altitud determinada, y más castigo para los motores, todo ello por culpa de ese 30 por ciento menos de rendimiento. ¿Qué lograríamos si pudiéramos utilizar nuestro combustible de 110 octanos, que ya tenemos, el cual debe producir una potencia efectiva superior en un 80 por ciento a la de los combustibles que ahora tiene Hitler?»

«En el último número de *Science*, los doctores Albert B. Sabin y Robert Ward, de la Fundación para la Investigación del Hospital Infantil y la facultad de medicina de la universidad de Cincinnati, informan de un descubrimiento que consagra la culpabilidad de las moscas como agentes propagadores de la parálisis infantil. Ya antes se había detectado el virus en moscas cazadas en zonas rurales. Insectos capturados en Cleveland y Atlanta, en vecindarios de pacientes afectados de parálisis infantil, eran vectores del virus. Mayor gravedad reviste la deteccion de éste en moscas de ciudad; esas moscas fueron halladas en barrios modernos dotados de buenas instalaciones sanitarias y en los que varios niños padecían unas enfermedades benignas que podrían haber sido parálisis infantiles frustradas.»

«Cuando se lanza un torpedo, en el interior de éste comienza a ocurrir una asombrosa sucesión de cosas en un intervalo de tiempo increíblemente corto. Una palanca de arranque, disparada por el movimiento de avance del proyectil, abre una válvula y una descarga de aire comprimido pone en marcha el motor principal. Otro mecanismo proporciona un chorro pulverizado de un combustible altamente inflamable. Estallan entonces dos cartuchos de combustión lenta, que se queman cual velas, con la misión de inflamar el chorro de combustible. En la misma fracción de segundo, un ingenioso mecanismo de regadera, autorregulado y de arranque automático, comienza a rociar la llama con agua. Recordemos que a poca distancia, un metro más o menos, hay del orden de 250 kilogramos de explosivo rompedor. El agua de la regadera se vaporiza y, regulando el volumen de rociado, mantiene la temperatura de la cámara de combustión exactamente a 677 ºC, ni un grado más. La mezcla de vapor, gas y aire comprimido penetra con tal energía en los motores principales que al instante se genera una potencia de 400 caballos y, rápidamente, el torpedo se acelera hasta una velocidad de casi una milla por minuto.»

... cien años

Scientific American: «Reclama nuestra atención un invento merced al cual es posible agrandar ópticamente un reloj ordinario hasta un tamaño que permite verlo desde unos 80 kilómetros a la redonda. La invención hace uso de un segundo tren de engranajes de relojería, controlado por el propio reloj, y se pone en movimiento a cada minuto, en que zumba y acciona una lente de destellos eléctricos. El haz luminoso reflejado hacia el cielo atraviesa, cuando el reloj da una hora redonda, un martillo de sonería en movimiento. Para los intervalos de cinco minutos se emplea otro símbolo y aún otro para los minutos sueltos. Este reloj permitiría sincronizar todo tipo de relojes, tanto de pared o mueble como de pulsera o bolsillo, sin ningún costo.»

«Cierto cazador de elefantes se había acercado a una pieza de gran tamaño, cuando, contrariado, descubrió que se le habían caído las municiones; no le quedó más remedio que permanecer oculto y gozar de la vista del imponente animal. Su disgusto lo compensó en parte la visión del elefante informando a la manada de que cerca acechaba un peligro. Cuando el animal reconoció la presencia del enemigo, cesó de comer, alzó cautelosamente la punta de la trompa y en un tono bajo y contenido, aunque penetrante, emitió con los labios el sonido "prat", repetidamente hasta hacerlo semejante al gorjeo de un pájaro. Ese sonido fue inmediatamente entendido por la manada, que rápida aunque silenciosamente se alejó seguida del centinela.»

La turquesa en la América prehispánica

Antes de la llegada de los conquistadores, esta piedra preciosa poseía una significación religiosa y social en Mesoamérica. En torno a ella se crearon estrechos y dilatados intercambios comerciales y culturales

Garman Harbottle y Phil C. Weigand

Cuando Cortés arribó a México en 1519, Carlos V gobernaba en España. Los ricos presentes entregados al conquistador por los embajadores del emperador azteca Moctezuma II no intentaban, sin embargo, ser los magníficos regalos que suelen cruzarse entre sí los monarcas. Eran ofrendas religiosas de una nación devota a uno de sus dioses. Moctezuma estaba convencido de que Cortés era el mismo Quetzalcóatl, el dios de la serpiente emplumada en forma humana que retornaba a México de su mítico viaje desde tierras lejanas.

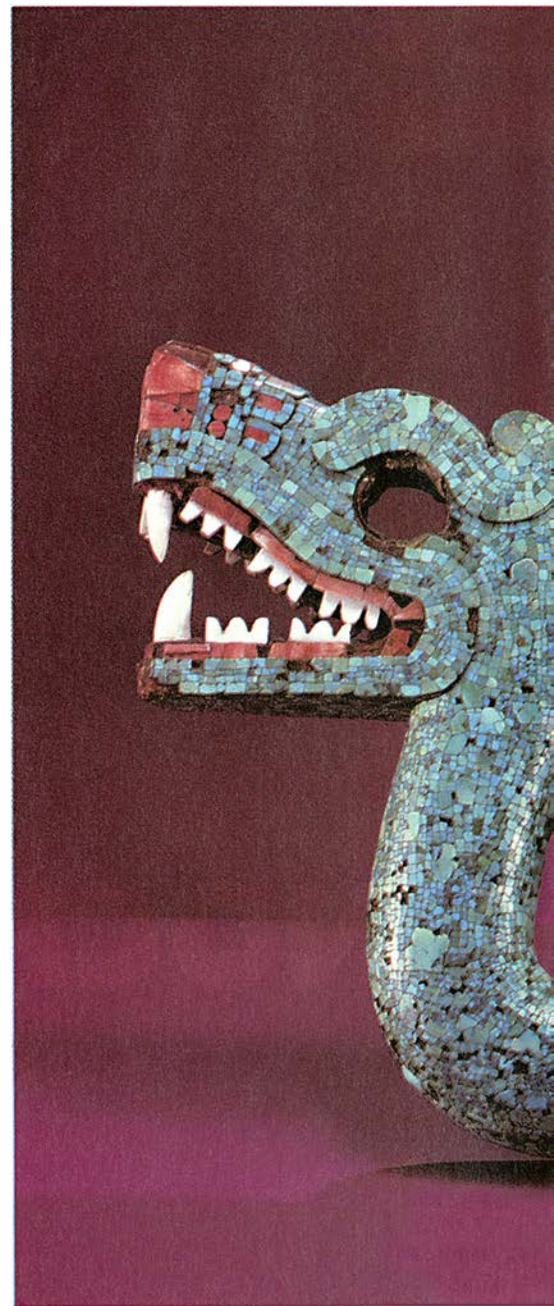
El cronista español Bernardino de Sahagún describe esos regalos: "Primeramente una máscara labrada de mosaico de turquesas; tenían esta máscara labrada de las mismas piedras una culebra doblada y retorcida... Estaba esta máscara exerida en una corona alta y grande, llena de plumas ricas, largas y muy hermosas, de manera que poniéndose la corona sobre la cabeza, se ponía la máscara en la cara. Llevaba por joel una medalla de oro redonda y ancha." Cuando los embajadores encontraron a Cortés y subieron a bordo de su barco, "pusiéronle primeramente la corona y máscara que arriba se dixo, y todo lo demás. Echáronle al cuello los collares de piedras que llevaban con los joeles de oro; pusiéronle en el brazo izquierdo la rodela de que se dixo arriba, y todas las otras cosas se las pusieron delante ordenadas, como suelen poner sus presentes."

La turquesa en esta sociedad precolombina mesoamericana era, evidentemente, algo más que un bien extravagante y preciado. Constituía un signo emblemático en el ámbito social y religioso. Las palabras de sabiduría se asimilaban a turquesas preciosas, y esa piedra acabó por transformarse en símbolo de pertenencia a la nobleza. Su consumo dejó atrás a otra piedra preciosa, el jade.

La copiosa presencia de turquesas talladas en Mesoamérica planteó un problema para los investigadores de la cultura de la región. No hay minas suyas en las zonas circundantes. La verdad es que los únicos grandes yacimientos se encuentran al norte, en el sudoeste de la Unión (lo que los norteamericanos llaman hoy el Sudoeste: Nuevo México, Arizona, Utah y Colorado) y en las zonas septentrionales de México. La inmensa mayoría de las minas de Norteamérica se extienden a lo largo de un gran arco desde California hasta Colorado. ¿Pudieron los mesoamericanos haber comerciado con los nativos del Sudoeste para la obtención de esa piedra que consideraban, en expresión metafórica, tan preciosa como el agua?

La postura académica tradicional sostenía desde hace tiempo que,

GARMAN HARBOTTLE y PHIL C. WEIGAND han estudiado el uso de los objetos de turquesa durante más de veinte años. Harbottle se doctoró en la Universidad de Columbia. Químico del Laboratorio Nacional de Brookhaven, aplicó principios de física nuclear a la resolución de problemas arqueológicos. Weigand es antropólogo y trabaja en el Colegio de Michoacán, México, y en el Museo del Norte de Arizona, en Flagstaff. Obtuvo su doctorado en la Universidad Meridional de Illinois; dirige proyectos arqueológicos en México y el sudoeste de los Estados Unidos.

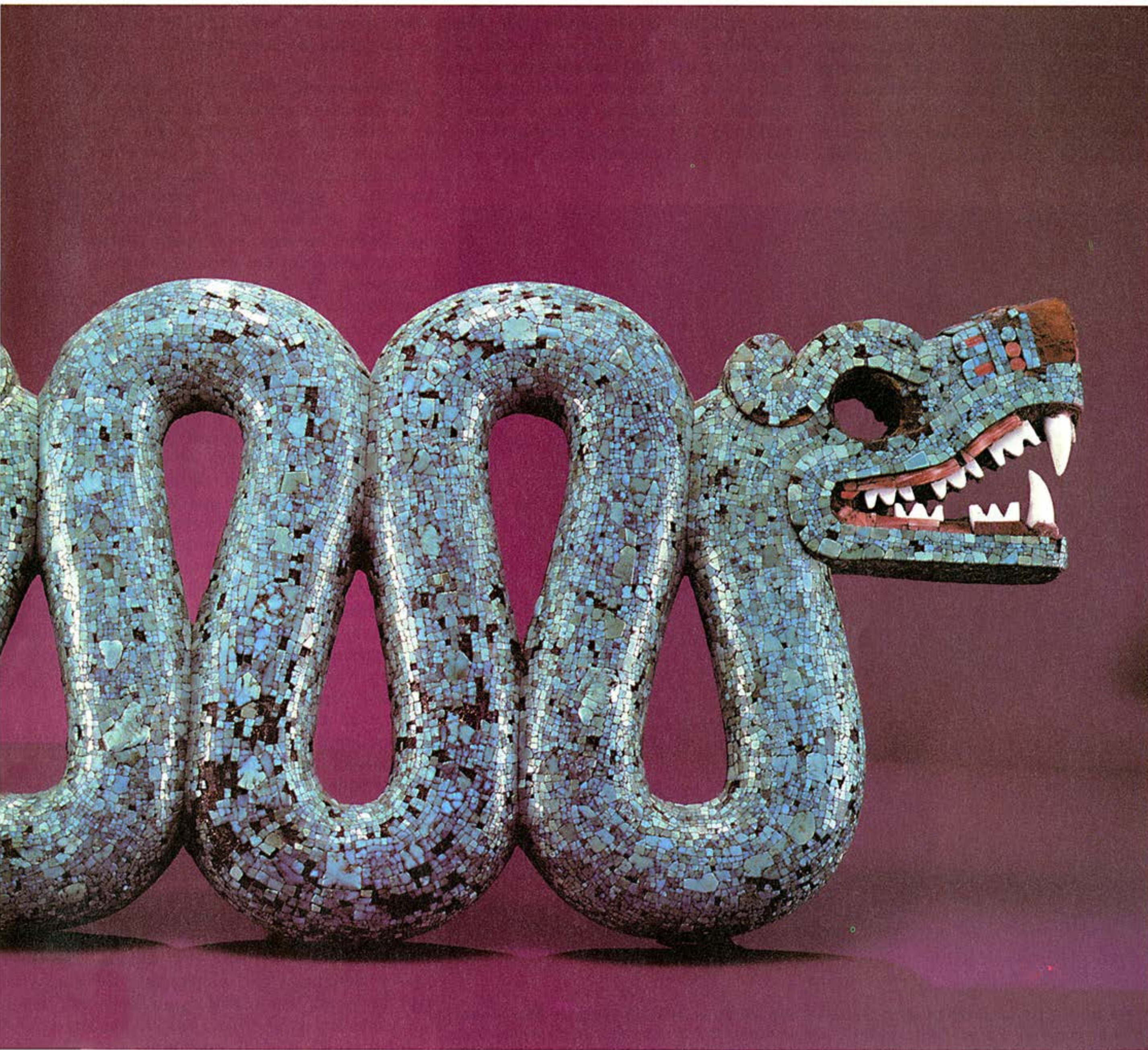


1. SERPIENTE BICEFALA, que se exhibe en el Museo Británico. Se trata de un colgante azteca de 43 centímetros de largo labrado en madera con incrustaciones de turquesa. Los rasgos faciales en rojo y la blanca dentadura están trabajados en concha.

en el mejor de los casos, sólo se darían contactos esporádicos entre una región y otra. Pero el análisis científico actual y la investigación arqueológica nos demuestran el desarrollo de un sistema comercial riguroso y altamente estructurado. La turquesa, que se conserva bien y fue objeto de amplísima demanda, aporta algunas de las pruebas más sólidas de esa interrelación sistemática. Además, las vías de comunicación abiertas para ese comercio facilitaron intercambios culturales recíprocos. De las pruebas recogidas se desprende que Mesoamérica ejerció un poderoso influjo en el desarrollo social del Sudoeste. Con el tiempo, los pueblos del Sudoeste llegarían a contemplar la turquesa como algo más que una mercancía para la exportación: la envolvieron en un significado teocrático, a la manera de los mesoamericanos.

Para corroborar la hipótesis de la comercialización formal de la turquesa, había que demostrar que la piedra beneficiada en una región era la misma que se usaba en otra. La arqueología ha desenterrado más de un millón de piezas de turquesa por todo el Sudoeste y Mesoamérica. El análisis químico descubre si una pieza guarda relación de parentesco con otra, aun cuando los objetos se hayan recogido en puntos muy alejados unos de otros o pertenezcan a distinto período.

La técnica dactilar de que nos servimos para seguir tales huellas fue el análisis de activación de neutrones. Para aplicar este método no agresivo, bombardeábamos la muestra con un haz de neutrones, creando varios radioisótopos de importantes elementos traza (sodio, potasio, bario, escandio), varios elementos de tierras raras, manganeso, hierro, cobalto, arsénico y cobre: es este último el que da a la turquesa su color característico. Podemos identificar las minas de turquesa en virtud de la presencia de ciertas cantidades definidas de esos elementos. En consecuencia, un patrón de composición similar denuncia un mismo filón de origen. A lo largo de los últimos



veinte años hemos venido aplicando la técnica de activación de neutrones al análisis de más de 2000 piezas recuperadas en 28 yacimientos arqueológicos de Mesoamérica y del Sudoeste y recogidas en más de 40 zonas mineras del Sudoeste. Analizábamos de 10 a 40 muestras por mina. De cada uno de los principales yacimientos examinamos un centenar de piezas. Gracias a ese proceder hemos seguido el rastro de decenas de piezas halladas en México hasta las minas de origen, distantes más de 1600 kilómetros, en Nuevo México, Arizona y Nevada.

Nos empeñamos también en calcular el consumo de turquesa con el fin de establecer el alcance y el asentamiento de su comercio. Conjugamos para ello diversos métodos. El más directo implicaba contar y a menudo pesar los artefactos recuperados en las excavaciones o los presentes en museos o colecciones particulares. Si las piezas no se habían registrado nunca de manera cabal, como las primitivas colecciones procedentes del cañón del Chaco, estimábamos su cuantía. Medíamos el volumen ocupado por las cajas que contenían esos productos y anotábamos el número aproximado por caja. Una simple multiplicación nos daba una idea cuantitativa ajustada. En otros casos, examinábamos las ilustraciones de los objetos de turquesa que aparecían en catálogos y libros de arte, y anotábamos su número. En lo concerniente a los mosaicos, sólo añadíamos las piezas que veíamos; por tanto, la estimación de las teselas o piezas de mosaico es, probablemente, demasiado baja.

Tamaña combinación de enfoques denuncia las limitaciones de nuestros cálculos. El avance de la investigación podría introducir alguna corrección en las cifras. Lo que no impide que creamos en la solidez de los cálculos y en su coherencia con el estado actual del conocimiento arqueológico. Cuando enmarcamos nuestra investigación con el trabajo realizado hasta entonces pudimos encajar las piezas de la historia del uso de la turquesa y reconstruir el desarrollo gradual de su comercio entre Mesoamérica y el Sudoeste.

La documentación arqueológica más temprana de esta gema se remonta al 600 a.C.; Rosa Reina, investigadora del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, la encontró cerca de Mezcala, estado de Guerrero, en diversos enterramientos. Piezas de muy extraña factura, datables del 300 a.C., fueron recuperadas en pozos funerarios cerca de Teuchitlán en Jalisco. Pero los mesoamericanos sólo empezaron a apreciar su valor con el desarrollo de culturas más complejas. La región chalchihuita de Zacatecas, México, se adelantó a todas en el consumo masivo de turquesa, durante la fase media de lo que los expertos denominan período Clásico (100-900 d.C.) de la cultura mesoamericana.



2. **MASCARA DE SERPIENTE de Quetzalcóatl, conservada en el Museo Británico. Muy probablemente constituye la máscara que, en 1519, se le presentó a Cortés en nombre de Moctezuma. Las dos serpientes enroscadas sobre la cara se han realizado con distintas tonalidades de turquesa que se cruzan por encima de la nariz.**

Alrededor del 600 d.C., la sociedad mesoamericana del noroeste se encontraba en pleno apogeo: beneficiaba los yacimientos cercanos de malaquita, azurita, chert, cinabrio, hematita y posiblemente cobre nativo. Hay pruebas de la explotación del mineral un siglo más tarde, cuando los habitantes del principal centro ceremonial de la zona, Alta Vista, iniciaron la importación de grandes cantidades de turquesa en bruto. A tenor del análisis de activación de neutrones, la zona neomexicana de Cerrillos constituía una cuenca notable de abastecimiento.

Alta Vista, recientemente explorada por J. Charles Kelley de la Universidad Meridional de Illinois, era el principal taller del que se tenga noticia de América del Norte. La turquesa tenía al principio una finalidad ceremonial: anillos, cuentas de collar, medallones y mosaicos discoidales formaban parte de los elementos de prestigio de los enterramientos. Los extremos de las teselas eran biselados. Comprobamos el interés del biselado para la estabilidad del mosaico y un acabado suave, en cuanto desmontamos varios fragmentos de un mosaico de turquesa procedente del período Posclásico de Oaxaca. La juntura entre dos piezas biseladas adyacentes se desvanece en una línea finísima. Las teselas se pegaban sobre una matriz de madera mediante una mezcla de carbón vegetal y aceite de chía, llamada chaute, aplicada al dorso de las piezas. El polvillo subyacente era un abrasivo silíceo, fino y trabajado, que empleaban los artesanos, así nos parece, para biselar, esmerilar y pulir las piezas.

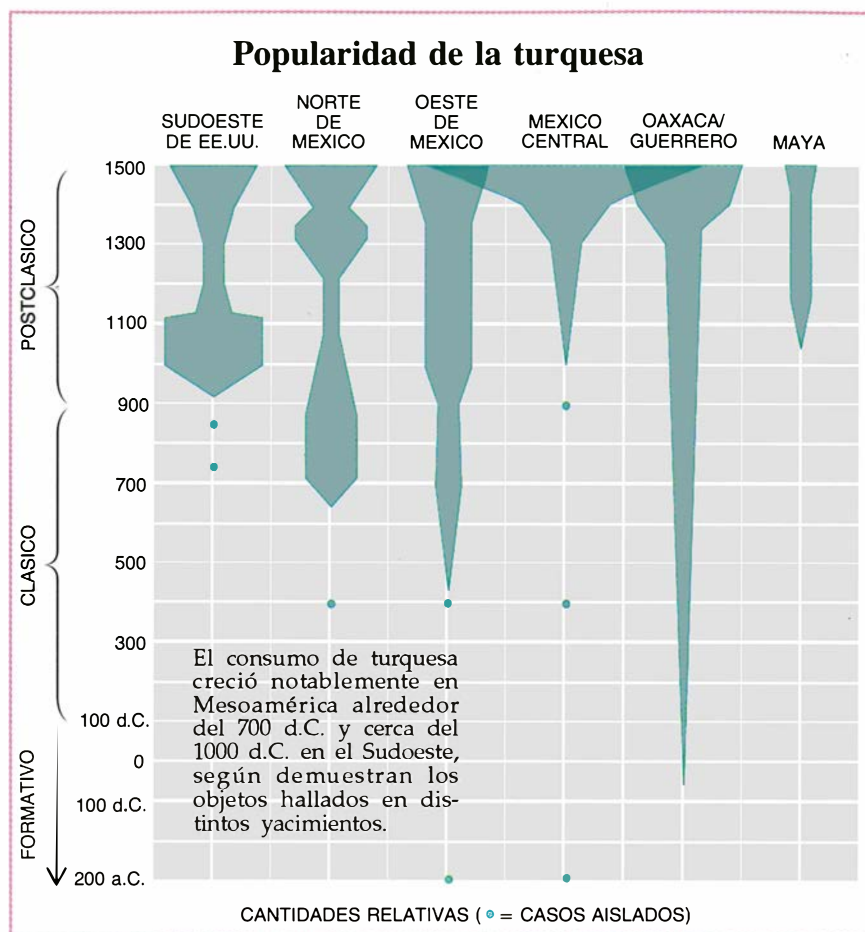
Además de objetos acabados, los arqueólogos han encontrado grandes

cantidades de desechos de turquesa y piezas en bruto en Alta Vista. Dimos con pruebas de la existencia de más turquesa sin procesar que la trabajada allí. El sobrante, reservado probablemente para otros fines, indicaba su exportación a otras partes. Cabía suponer que los destinatarios, durante el período Clásico, eran las ciudades de México central: Teotihuacán y Cholula. Aun cuando en ninguna de las dos hemos hallado un número sustancial de objetos, hay que reconocer que tampoco se han explorado bien los lugares idóneos para tales hallazgos: las tumbas de los personajes de alto rango.

Los períodos siguientes que respaldan el consumo de dicha piedra en Mesoamérica son el Clásico Tardío (circa 700-900 d.C.) y el Posclásico Temprano (circa 900-1200 d.C.). La turquesa se halla extendida por toda Mesoamérica. Los pueblos del Sudoeste, en particular los situados en el cañón del Chaco y su zona de influencia, inician por entonces el uso de la turquesa, pero sólo en cantidades pequeñas. Se sigue beneficiando todavía para exportarla hacia Mesoamérica.

Los progresos extraordinarios que acontecen durante el asentamiento anasazi en el cañón del Chaco, datado en la fase final del período Pueblo II (circa 1050-1180 d.C.), ilustran la influencia recíproca entre Mesoamérica y el Sudoeste a través del comercio de la turquesa. Los comienzos modestos de aldeas desperdigadas por la meseta de Colorado se transformaron en un sistema social de organización jerárquica en el cañón del Chaco: la aparición de grandes agregaciones de edificios exóticos, construidos según nuevas técnicas arquitectónicas, sugiere una estructura política y económica perfectamente articulada. No se trataba sólo de una arquitectura desconocida en el Sudoeste; se importaron también técnicas constructivas de Mesoamérica: muros rellenos de escombros y paredes de albañilería, como puede observarse en el cañón y en las dos plataformas frente a Pueblo Bonito.

Además, había una amplia red viaria en el asentamiento que comunicaba el cañón del Chaco con otros pueblos de similares características constructivas. El acceso protegido a recursos poco comunes —demostraremos que la turquesa era uno de éstos— constituyó una fuerza decisiva en el espectacular desarrollo comunitario del asentamiento. Todos esos factores, considerados en su conjunto, presentan una sociedad que desempeñaba un papel especial en la frontera norte de Mesoamérica.



El consumo de turquesa creció notablemente en Mesoamérica alrededor del 700 d.C. y cerca del 1000 d.C. en el Sudoeste, según demuestran los objetos hallados en distintos yacimientos.

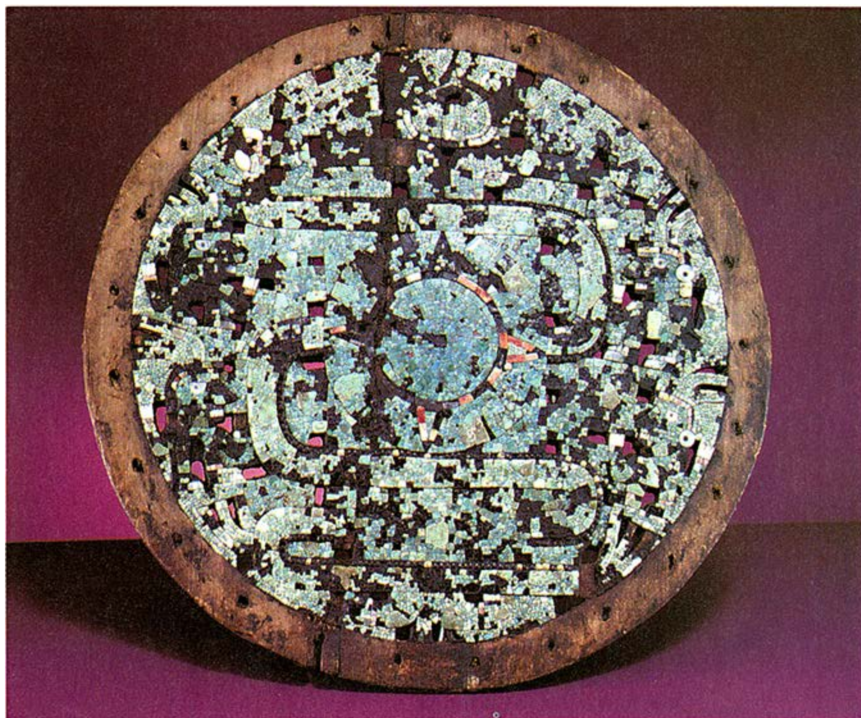
El influjo de Mesoamérica en el Sudoeste se refleja, asimismo, en el conjunto de relaciones intracomunitarias. Las ciudades mesoamericanas, sin grandes concentraciones, solían hallarse dispersas. En el Sudoeste, si admitimos que los grupos pueblo del cañón eran distritos de un mismo asentamiento, y no aldeas igualitarias, podemos ver en ello la existencia de una ciudad incipiente a la manera mesoamericana.

Algunas consideraciones más abonan la idea de una influencia presumible de la cultura del Posclásico Temprano mesoamericano sobre el cañón del Chaco. Lo corroboran las importaciones de bienes de lujo como guacamayos y campanas de cobre, desenterrados en el cañón. Se han hallado tumbas refinadas, parecidas a las de Mesoamérica. Por último, el Sudoeste se decidió por el consumo masivo de turquesa, de forma muy similar a lo sucedido tres siglos antes en Mesoamérica.

En efecto, el cañón del Chaco encierra algunos de los hallazgos más nutridos. Jonathan Reyman, de la Universidad estatal de Illinois, cifró en 500.000 el número de piezas recuperadas. W. James Judge, entonces en la Universidad Metodista del Sur, lo rebajó a 200.000. Sea cual sea la cifra más exacta, ambas resultan impresionantes. El uso ceremonial de la turquesa durante el momento álgido de actividad cultural (circa 975-1130 d.C.), en tumbas complejas y grandes kivas (estructuras ceremoniales), carecía de precedentes en el Sudoeste. El modelo más afín de cuantos le antecedieron, en el uso de la turquesa a semejante escala, es Alta Vista.

La turquesa empleada venía, en buena medida aunque no exclusivamente, de Cerrillos. Muchas teselas, biseladas, se cortaban de acuerdo con patrones normalizados. Ya que el biselado y la normalización son innovaciones mesoamericanas (probablemente de Alta Vista), su presencia en el Sudoeste constituye otro indicador poderoso de la conexión entre ambas regiones.

Además, para cumplir el extravagante ceremonial que requería el uso de turquesa, la gente del cañón del Chaco controlaba su distribución. David H. Snow, entonces en el Museo de Nuevo México y pionero en el estudio del uso de la turquesa en el Sudoeste, dio cuenta de la acumulación de la gema en el cañón del Chaco. Intervino en la demostración de que el sistema de obtención del mineral funcionaba allí casi en régi-



3. ESCUDO AZTECA trabajado con teselas de turquesa pegadas sobre un disco de madera de 30,5 centímetros de diámetro. Arrancando de las 10 en punto, una serpiente se va enroscando en torno al eje vertical. En los agujeros del borde se fijaban plumas.

men de monopolio. Nuestros análisis de activación de neutrones han corroborado una ligazón directa entre la turquesa del cañón del Chaco y las turquesas recuperadas de otros yacimientos del Sudoeste (cuenca de Tucson y Snaketown, ambos en Arizona). Es muy probable que la turquesa de Mesoamérica viniese directamente del cañón. Los objetos encontrados en diferentes enclaves de México (Guasave en Sinaloa, Las Cuevas y Zacoalco en Jalisco e Ixtlán del Río en Nayarit) responden a la turquesa chaqueña beneficiada en Cerrillos.

La irregular distribución de la turquesa durante el apogeo del cañón del Chaco guarda paralelismo con otro avance. Tras adoptar la técnica de los bordes biselados y la normalización de las teselas para micromosaicos, el Sudoeste dejó de comercializar la turquesa en bruto para las sociedades consumidoras del corazón de Mesoamérica. El proceso de elaboración culminaba en el propio Sudoeste. El sistema de extracción y manufactura en el cañón del Chaco constituye, probablemente, el primer signo de integración estructural del Sudoeste en el sistema comercial mesoamericano, proceso que se intensificará con el tiempo.

El cañón del Chaco perdió, así parece, su monopolio en el siglo XII, lo que sin duda contribuiría a la desintegración de su cohesión social. Otros yacimientos, como las ruinas aztecas en Nuevo México, predominarán en la región anasazi desde las postrimerías de esa centuria. Como David R. Wilcox, del Museo de Arizona del Norte, ha apuntado, no existía otro centro que pudiese tomar el relevo del cañón del Chaco en el sistema comercial, aunque perduraron los mecanismos de obtención de turquesa y de intercambio. Todavía más: su consumo en Mesoamérica siguió aumentando durante el siglo XIII.

Paralelamente a ese crecimiento en Mesoamérica se asiste a un cambio de orientación en el consumo del Sudoeste. La gema, inicialmente posesión exclusiva de las élites religiosas y políticas, se documenta ahora entre la pedrería con que se engalanan las clases inferiores. En adelante, la turquesa dejaría de emplearse en usos exóticos y extravagantes, discriminando tanto a los individuos en tan pocos sitios. Ese modelo de consumo se hundió en el Sudoeste cuando se rompió el monopolio del cañón del Chaco.

La mayor demanda del Sudoeste creó graves problemas de suministro. Para cubrir las necesidades de Mesoamérica y de la propia región, tuvieron que abrirse, a mediados del siglo XIII, nuevas explotaciones. El primer gran período de la minería de la turquesa había empezado, y no hallaría par, seguramente, hasta después de la Segunda Guerra Mundial. Charles C. di Peso, de la Fundación Amerindia, dirigió las investigaciones del centro urbano mesoamericano de Casas Grandes en Chihuahua y recogió turquesas procedentes de muchos filones nuevos. La zona estudiada abarcaba el desierto de Mojave, sur de Nevada, extremo sudoeste de Nuevo México y el inagotable Cerrillos. Con otros más, Casas Grandes se convirtió en centro de almacenamiento y expedición de turquesas hacia el mercado mesoamericano, siempre en expansión. La abertura de nuevas minas evoca un comportamiento similar en nuestros días: cuando crece la demanda del petróleo y suben sus precios, se recurre a la explotación de zonas de acceso difícil, como el mar del Norte y la vertiente de Alaska.

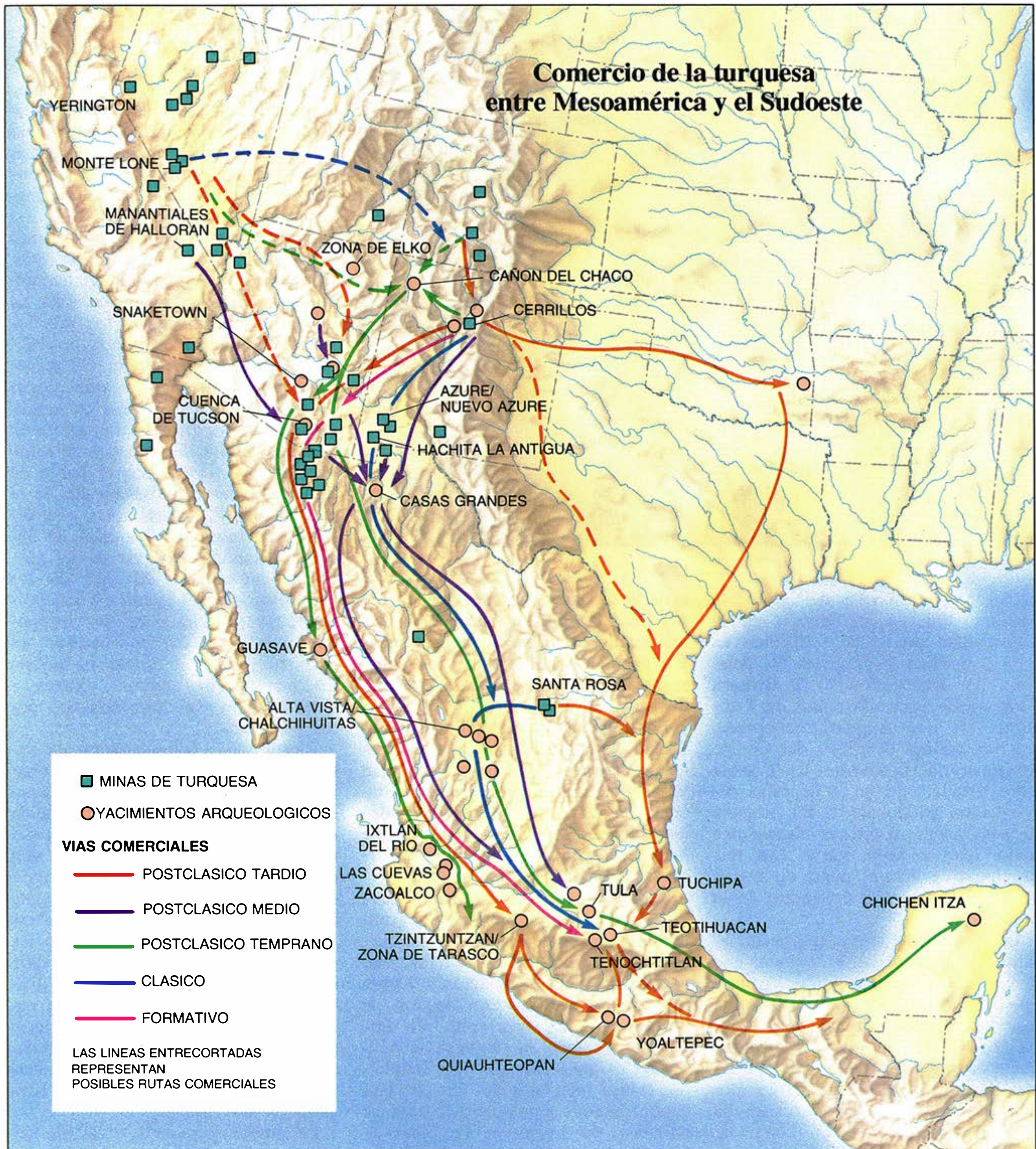
El incremento de la demanda de turquesa avivó las rutas comerciales entre el Sudoeste y Mesoamérica. Muchos pueblos del camino se enriquecieron con el control del comercio. Fue el caso, por ejemplo, del despertar de Tarasco, durante el Posclásico Tardío; ese estado de México oriental se extendía a lo largo de la ruta costera del Pacífico, la más propicia para el comercio de la turquesa. La mayoría de los comerciantes que trabajaban en la frontera septentrional de Mesoamérica no habían tenido problemas para transportar sus mercancías costa abajo. Hasta que los tarascos se interpusieron y comenzaron a controlar el tráfico. Helen P. Pollard, de la Universidad estatal de Michigan, ha sugerido que los mercaderes tarascos, que recibían protección real, no intervinieron en el comercio de la turquesa. Pero muchos de los objetos de lujo relacionados con la gema desenterrados en Tzintzuntzan (Michoacán), capital de los tarascos, denuncia el alto valor de la piedra para sus habitantes. Otros estados más pequeños medraron también en la costa del Pacífico y gravaron, a buen seguro, el paso de la mercancía.

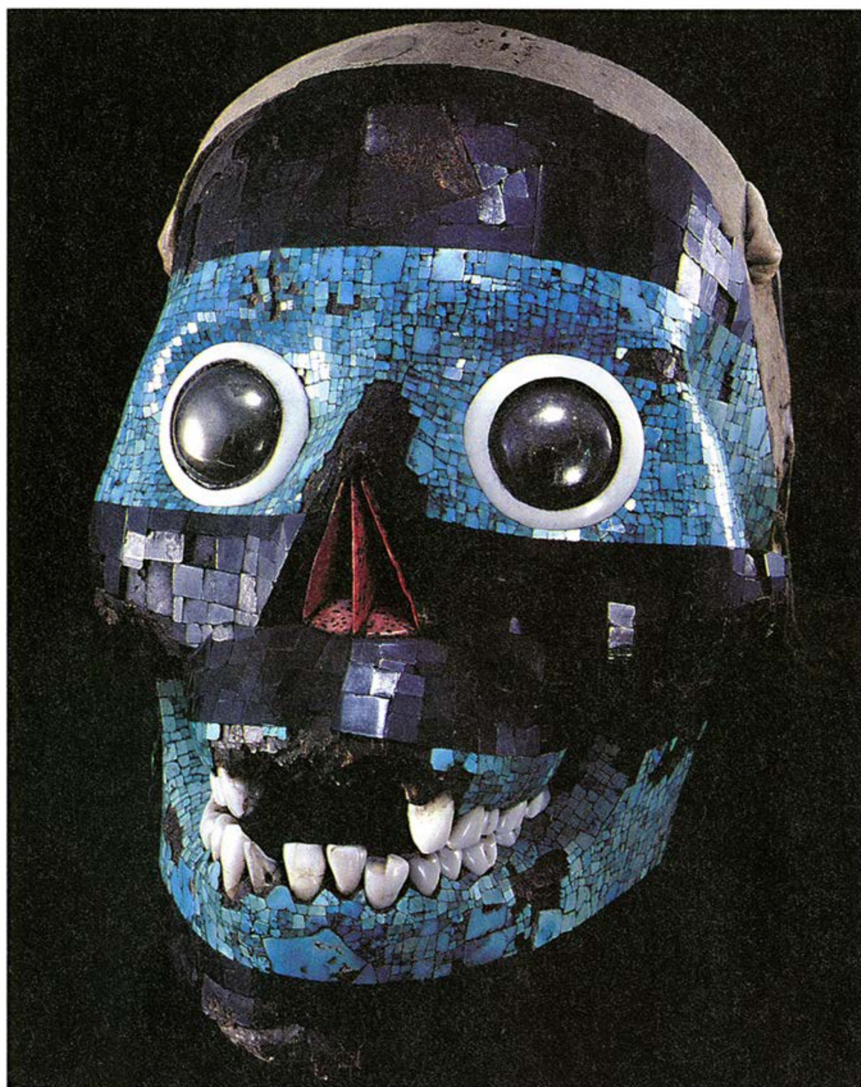
Mas, a pesar de todas esas dificultades, la ruta de la costa resistió, gracias, en parte, a que discurre por un pasadizo muy poblado, cuyas gentes estaban interesadas en mantenerlo. De México central a la periferia del noroeste hay un largo trecho, pero algunos kilómetros pueden recorrerse por vía marítima. Coronado siguió la ruta costera del Sudoeste y las llanuras adyacentes en sus exploraciones de 1540.

Una segunda ruta, interior y directa, abastecía mejor México central. Transcurría por las estribaciones a poniente de la Sierra Madre Occidental y cruzaba regiones ralamente pobladas, carentes de barreras naturales en su avance hacia el noroeste. La desventaja de esta ruta, además de la aridez y la distancia, era que había que construirla y cuidar su buen estado. Los gobiernos fuertes e independientes del oeste mesoamericano podían también entorpecer el acceso hacia esa segunda ruta por los Altos de Jalisco y por el valle de Lerma, ya fuera para controlar la ruta por ellos mismos o para cortar el paso hacia la zona central de México.

Muy bien documentadas están las rutas comerciales hacia el sur, entre los mexica culhua y los altiplanos guatemaltecos (para el comercio de jade y plumas de quetzal) y entre los mexica culhua y las colonias de *puchteca* (mercaderes) en Xoconusco (para el comercio de cacao). Estas dos rutas salvaban distancias impresionantes, a través de zonas densamente pobladas, en las que algunas comunidades estaban sojuzgadas.

El despegue de la demanda de turquesa abrió otros caminos. Tenemos pruebas de que, desde los tiempos de la conquista, la gema llegaba a los mexica culhua por dos vías distintas: desde las provincias de Quiauhteopán y Yoaltepec, ambas situadas al sur de México central, próximas a la costa del Pacífico; y desde Tuchipa





4. MASCARA DE TURQUESA labrada sobre un cráneo humano: otro de los obsequios de Moctezuma a Cortés. Representa al dios azteca Tezcatlipoca. Los ojos son de pirita de hierro y concha blanca; la cavidad nasal contiene fragmentos de concha rosa.

en la costa huaxteca del golfo de México. Frances F. Berdan, de la Universidad estatal de California en San Bernardino, y Patricia R. Anawalt, del Museo Fowler de Historia Cultural de la Universidad de California en Los Angeles, concluyen, tras un análisis detallado del Códice Mendoza, que la mayoría de la gema transportada a lo largo de estas rutas estaba ya trabajada. En ninguna de esas zonas ni en sus alrededores hubo, que se sepa, vetas. Las tres provincias actuaron, pues, de meros intermediarios en el transporte de la mercancía.

Las provincias tenían que acaparar turquesa para pagar el tributo que debían a los mexica culhua. Tributo que primero se cobraba, sin duda, de los comerciantes de paso por Tuchipa. El Códice nos revela también que esta provincia tenía que aportar anualmente al emperador azteca, por lo menos, dos mosaicos redondos de "pequeñas piedras" y un collar de cuentas, aquéllos y éste de turquesa. Parte de la turquesa de Tuchipa procedería de las minas de Concepción del Oro/Mazapil, en la frontera entre los estados mexicanos de Zacatecas y Coahuila. Esta hipótesis es coherente con los trozos huaxtecas hallados en los yacimientos.

Los mercaderes que salían del Sudoeste y tomaban las rutas que abastecían Tuchapa de turquesa podían traerse de regreso conchas de caracolas de mar, procedentes del golfo de México. Conchas de ese tipo se han desenterrado en yacimientos arqueológicos tardíos del Sudoeste.

Todo parece indicar que incluso los estados hostiles abrían sus fronteras a los comerciantes de turquesas. Cuando los aztecas de la zona central mexicana estuvieron en guerra con los tarascos, no dejaron de obtener grandes cantidades de turquesas. Además, la turquesa se vendía en el gran mercado del Tlatelolco, centro mercantil de Tenochtitlán, capital azteca: esas transacciones se hallaban, por lo que se ve, libres de control estatal. No hemos de olvidar que las exigencias culturales alimentaban la demanda. Tenían que construirse mosaicos de intención ritual para su empleo en las inacabables ceremonias del estado.

La evolución social y las rutas comerciales no son los únicos parámetros para explicar la satisfacción de la demanda de turquesa antes del Descubrimiento. Las minas y las técnicas utilizadas para la extracción de la piedras son también ilustrativas. Hemos localizado unas 120 explotaciones mineras, antiguas, distribuidas en 28 áreas. Las fuentes históricas describen un número mayor, varios centenares quizá, que la minería moderna ha obliterado.

Nuestra exploración de minas antiguas no estuvo exenta de peligros. El interior de los pozos chalchihuitas, por ejemplo, se encontraban tal como los habían dejado los mineros precolombinos. Aparte de la posibilidad real del hundimiento del techo, operarios de entonces y arqueólogos de hoy tenían que trabajar en condiciones muy precarias: calor sofocante y pobre ventilación, incapaz de renovar un aire viciado por el humo de las teas y por el polvo creado de la excavación. En otras minas chalchihuitas encontramos legiones de insectos diminutos que vivían del guano de murciélago. El olor de los murciélagos y del guano era insoportable; por si fuera poco, los artrópodos aquellos veían en nosotros un irresistible bocado. Pululaban inquietos por nuestras piernas, brazos y caras cuando nos arrastrábamos por los pasadizos.

Cierta mina contemporánea que estudiamos, habilitada en mejores condiciones que las anteriores, se llamaba Accidente Metálico. Se nos tenía que haber avisado. La plataforma del talud superior se derrumbó sobre uno de nosotros (Weigand), quien rodó montaña abajo ennvuelto en una nube de polvo, piedras, bolsas de muestras y equipo fotográfico. Muchas de las minas de turquesa se encuentran muy aisladas, lo que añadido a las dificultades del trabajo producen un estrés psicológico. No podemos, pues, menos que admirar el coraje y tenacidad de aquellos mineros que trabajaban en lugares apartados y en condiciones muy duras.

La propia extracción tuvo que ser un empeño agotador. La mayor parte de la materia prima yace en filones

de roca dura, lo que obliga a extraer una piedra de otra mediante un trabajo que no es ni sencillo ni rápido. Lo contaba ya J. E. Pogue en su obra clásica de 1915 *The Turquois*: se hacía fuego ante la roca, para calentarla; luego, se echaban baldes de agua contra la misma, a fin de resquebrajar las vetas abiertas de turquesa. Se trataba, pues, de un proceso de extracción que exigía el acarreo hasta la mina de agua y leña abundantes. Los obreros golpeaban con mazas de piedra la superficie resistente de la roca: un trabajo agotador en un clima sofocante. La ingeniería empleada en la mayoría de las minas era rudimentaria. Sólo en algunos casos hemos hallado cámaras entibadas, estructuras que caracterizan a las minas chalchihuitas.

Se explotaban primero los filones inmediatos a la superficie, excavando zanjas o abriendo canteras. Las minas propiamente dichas se beneficiaban cuando se agotaba el material a cielo abierto. La mayoría de ellas son pozos mineros unicamerales, de los que hemos descubierto un gran número en Hachita, Nuevo México. Algunas veces, la mina se expandía en profundas zanjas a cielo raso. La cantera del monte de Chalchihuitl, en la zona minera neomexicana de Cerrillos, es la mejor conocida y documentada, pero había otras, como la mina tolteca del desierto de Mojave.

Las mazas de piedra recuperadas de minas antiguas no evidencian una técnica especialmente adelantada. Mazas de doble cabeza y acanaladas en sus tres cuartas partes constituían las herramientas habituales. Su considerable peso y la tenaz persistencia de los mineros en el trabajo nos sugieren en qué alto precio debía tenerse el producto beneficiado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TURQUOISE MOSAICS FROM MEXICO. Elizabeth Carmichael. Trustees of the British Museum, 1970.

TURQUOISE SOURCES AND SOURCE ANALYSIS: MESOAMERICA AND THE SOUTHWESTERN USA. P. C. Weigand, G. Garbottle y E. V. Sayre en *Exchange Systems in Prehistory*. Dirigido por T. K. Earle y J. E. Ericson. Academic Press, 1977.

CHEMICAL CHARACTERIZATION IN ARCHAEOLOGY. Garman Harbottle en *Contexts for Prehistoric Exchange*. Dirigido por Jonathan E. Ericson y Timothy K. Earle. Academic Press, 1982.

MINING AND MINING TECHNIQUES IN ANCIENT MESOAMERICA. Dirigido por Phil C. Weigand y Gretchen Gwynne en *Anthropology*, volumen 6, números 1-2; mayo-diciembre de 1982.

Volcanes de lodo de las Marianas

A lo largo de fallas inmediatas a la fosa de las Marianas afloran rocas del manto, transformadas en lodo serpentínico por fluidos que destila la placa en subducción, y crean montañas sobre el lecho oceánico

Patricia Fryer

A casi 4000 metros de profundidad, en pleno océano Pacífico, Dudley B. Foster encendió las luces exteriores del sumergible *Alvin*. Janet A. Haggerty y yo nos pegamos a los ojos de buey de 10 centímetros, deseosas de contemplar por vez primera el suelo marino. Un par de minutos más tarde nos posábamos en una suave pendiente ligeramente sedimentada entre un grupo de pequeñas rocas verdes, veteadas de blanco. Durante las cinco horas siguientes, pasando frío y dobladas en posición fetal en el interior angosto del *Alvin*, olvidamos por completo las incomodidades físicas mientras explorábamos una montaña de lodo verde, a 80 kilómetros al oeste de la fosa de las Marianas.

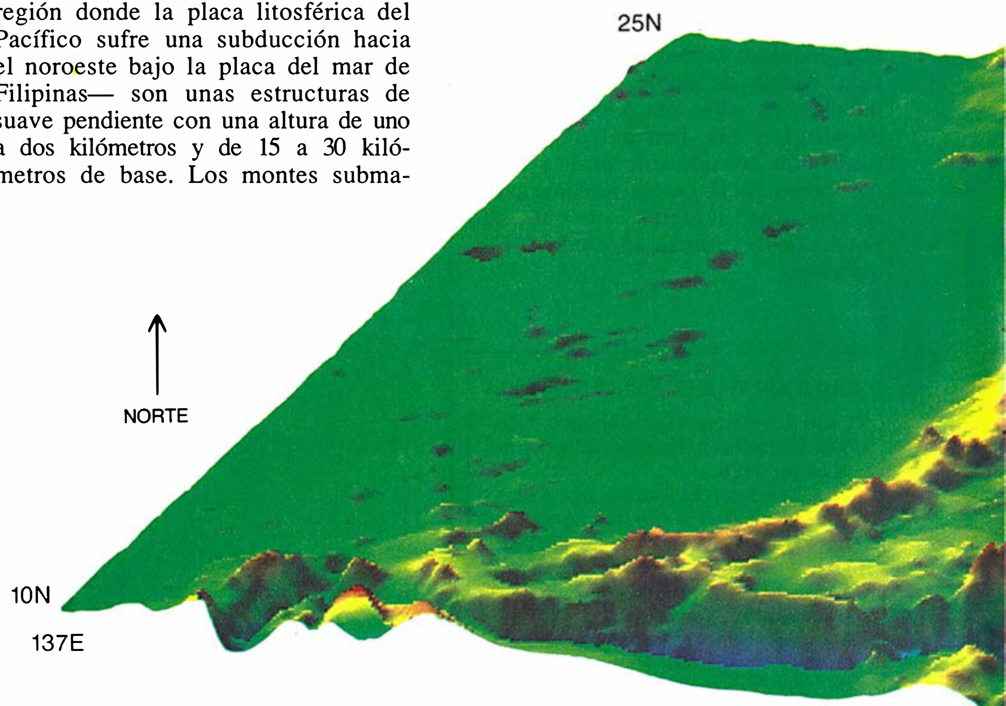
La composición insólita de este monte submarino, uno de las varias docenas de grandes montañas que se distribuyen en un área de 100 × 1000 kilómetros, al oeste mismo de la fosa submarina más profunda del mundo, sugería nuevas respuestas a múltiples interrogantes que tenía planteados la geología marina. El principal: ¿qué ocurría con el agua y otros fluidos expelidos de las rocas durante la subducción?

La subducción acontece cuando colisionan las placas de la litosfera terrestre y una es empujada hacia abajo, hacia el interior del manto. El calor y la presión deshidratan las rocas de la placa en descenso, pero durante mucho tiempo los geólogos ignoraban el destino final de ese fluido. Yo misma tercié con algunos de mis colegas y propusimos que los fluidos expelidos de una placa en subducción reaccionaban con la roca del manto y transformaban unas partes del manto en minerales de baja densidad, que ascenderían lentamente a través de la zona de subducción hasta el lecho oceánico. No sabía lo que nos esperaba en las Marianas.

Embarcamos en el *Alvin* en 1987, tras más de una década dedicada a la observación, muestreo y obtención de imágenes de sonar de los montes submarinos de las Marianas. El piloto Foster, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, Haggerty, de la Universidad de Tulsa, y yo habíamos bajado para observar *in situ* una estructura que parecía desafiar las reglas tanto de la tectónica de placas como de la geoquímica.

Estos enigmáticos montes submarinos del prearco de las Marianas —la región donde la placa litosférica del Pacífico sufre una subducción hacia el noroeste bajo la placa del mar de Filipinas— son unas estructuras de suave pendiente con una altura de uno a dos kilómetros y de 15 a 30 kilómetros de base. Los montes submarinos de forma y tamaño similares en otras regiones están formados por lavas de erupciones volcánicas. En cambio, algunos de los montes submarinos de las Marianas parecían hallarse constituidos fundamentalmente por un lodo blando cuya consistencia se aproximaba a la del requesón. Y aunque existen estructuras de una consistencia similar, los denominados volcanes de lodo —montículos de sedimentos removidos que se forman asociados a filtraciones de hidrocarburos— alcanzan alturas de centenares de metros, muy pocos, y albergan un conjunto de minerales totalmente diferentes de los que nosotros íbamos descubriendo.

Las primeras sospechas de que los montes submarinos de las Marianas



1. PREARCO DE LAS MARIANAS: hacia el oeste de la fosa de las Marianas (al sur de Filipinas) se sitúa sobre la placa del Pacífico en subducción. Rocas metamorfizadas del manto ascienden a través de fallas del prearco para formar montañas submarinas. La autora y sus colegas descubrieron estos montes submarinos poco comunes y desarrollaron una teoría sobre su origen.

PATRICIA FRYER ha dedicado la mayor parte de su vida profesional a investigar la geología de las Marianas. Se halla adscrita a la Escuela de Ciencia y Tecnología Oceánicas y Terrestres de la Universidad de Hawai en Manoa, donde se doctoró en geología y geofísica.

se salían de lo común llegaron a finales de los setenta. Los geofísicos esperaban que cualquier monte submarino que hubiera en el prearco de las Marianas fuera de tipo volcánico. Al fin y al cabo, las islas Marianas se formaron a partir de magma generado sobre zonas de la placa del Pacífico sumergida hasta una profundidad de unos 80 a 150 kilómetros.

Sin embargo, los datos geofísicos marinos que habíamos recopilado no estaban en consonancia con esta interpretación. Por ejemplo, los montes submarinos de origen volcánico suelen mostrar una fuerte impronta magnética porque el campo magnético terrestre orienta los minerales magnéticos que cristalizan a partir de la lava. Esta alineación hace que el monte submarino se comporte a modo de un imán enorme. Los montes submarinos volcánicos de las cuencas oceánicas presentan también una anomalía positiva de gravedad, que refleja su masa anormalmente grande, en comparación con los valores típicos de gravedad regional de la placa oceánica circundante. Algunos montes submarinos del prearco de las Marianas carecían de una y otra peculiaridad.

Desde entonces, los geólogos interesados en la región han trenzado modelos teóricos con trabajo de campo para determinar de qué constan y cómo se formaron las montañas. Nuestros conocimientos de partida sobre la mecánica y la química de fluidos de las zonas de subducción nos orientaban en los datos a recoger, cuyo posterior análisis enriquecía extraordinariamente nuestra comprensión del medio.

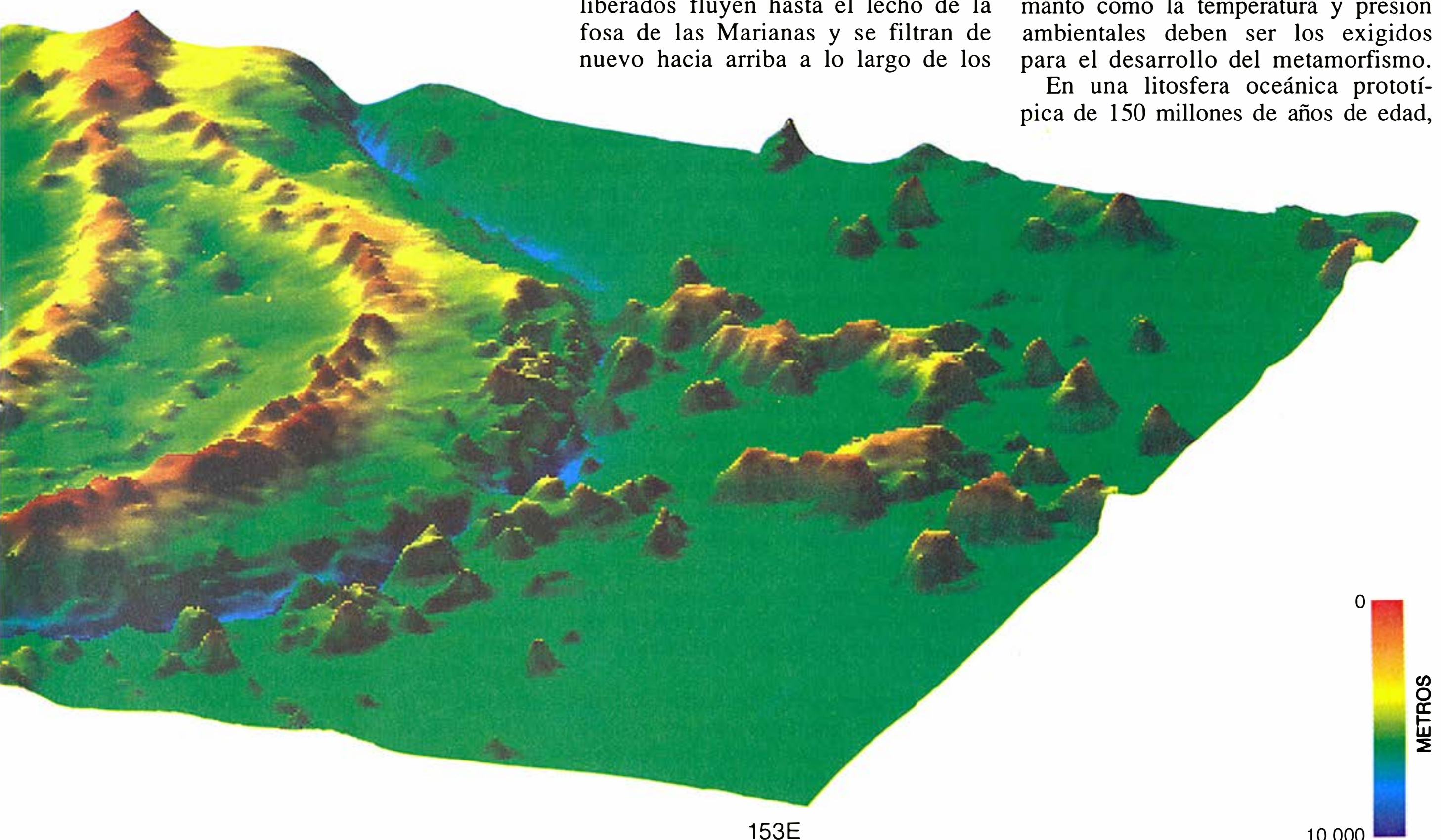
Donald M. Hussong, en aquel entonces en la Universidad de Hawai (presidente hoy del Servicio Internacional de Inspección Submarina), y yo sospechábamos que montes submarinos tan insólitos serían diapiros, masas de roca de una densidad relativamente baja que ascienden por inestabilidad gravitatoria a través de los estratos suprayacentes. (Los diapiros de sal del golfo de México constituyen quizás el ejemplo mejor conocido.) En el caso del prearco de las Marianas, pensábamos que había muchas probabilidades de que los diapiros estuvieran compuestos de roca del manto, alterada por la interacción con fluidos destilados de la placa litosférica del Pacífico subyacente.

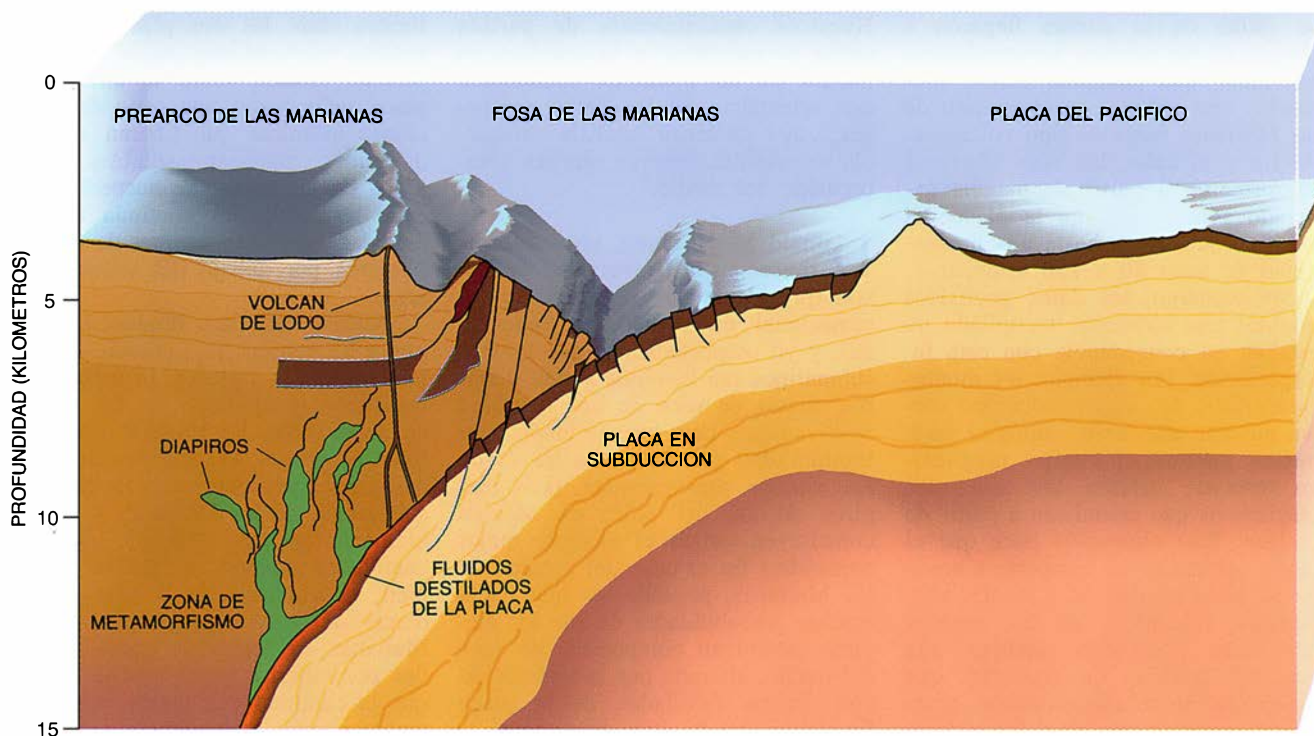
A medida que desciende esta placa, los sedimentos y rocas que la componen pierden agua mediante diversos procesos químicos y físicos. En el trayecto desde el suelo oceánico hasta unos 15 kilómetros más abajo, la creciente presión de la roca suprayacente exprime los fluidos de los sedimentos porosos y los expulsa por las fracturas y otras aberturas de las rocas. Estos fluidos liberados fluyen hasta el lecho de la fosa de las Marianas y se filtran de nuevo hacia arriba a lo largo de los límites entre las dos placas convergentes, o se infiltran en la roca del prearco situada sobre el borde. La placa sufre luego una serie de reacciones químicas que liberan agua y diferentes compuestos solubles contenidos en las rocas. Se sospecha que esta deshidratación continúa a profundidades bastante mayores de 200 kilómetros por debajo del sistema del arco.

¿Adónde van estos fluidos? La pregunta ha venido inquietando, durante décadas, a cuantos investigan el equilibrio geoquímico de las placas en subducción. La litosfera oceánica lleva al menos 45 millones de años desapareciendo dentro de la zona de subducción de las Marianas, y probablemente se han destilado de ella cantidades ingentes de fluidos. Ahora bien, el volumen de fluidos procedentes del arco suprayacente de las Marianas en forma de gases liberados por vulcanismo es mucho menor que la cantidad que podría esperarse que generara la litosfera.

Para explicar semejante desequilibrio se ha creado la hipótesis de la "esponja metamórfica". Los fluidos liberados de la litosfera inician el metamorfismo de las rocas suprayacentes del manto, invirtiendo las reacciones que expulsaron el agua de la corteza en subducción. Esta conveniente respuesta requiere, sin embargo, un conjunto especial de condiciones: tanto la mineralogía de las rocas del manto como la temperatura y presión ambientales deben ser los exigidos para el desarrollo del metamorfismo.

En una litosfera oceánica prototípica de 150 millones de años de edad,





2. MODELO DE LA ESPONJA METAMORFICA para explicar el destino de los fluidos expelidos de las placas oceánicas en subducción. La autora afirma que las rocas suprayacentes sobre la placa absorben los fluidos destilados por medio de reacciones que forman minerales de baja densidad como la serpentina. La serpentina asciende por líneas de fractura hacia el lecho del océano en masas diapíricas o como lodos volcánicos fríos.

el incremento de la temperatura con la profundidad determinaría que a los 30 kilómetros de profundidad ese parámetro alcanzara los 500 grados Celsius. Pero los modelos teóricos de la estructura térmica de la región de las Marianas creados por Gerard Fryer, de la Universidad de Hawai, implican que la temperatura de la parte superior de la placa del Pacífico a 100 kilómetros al oeste del eje de la fosa de las Marianas y unos 30 kilómetros por debajo del prearco sea de sólo un centenar de grados. La placa del Pacífico rebaja la temperatura de la corteza profunda y del manto a través de los cuales desciende durante la subducción. Si la velocidad del enfriamiento cae dentro de un rango determinado, el sistema de subducción mantendrá unas temperaturas anormalmente bajas en profundidad; y ello depende de la velocidad y del ángulo de la subducción, de la edad de la corteza (del grado, pues, en que ya se hubiese enfriado), de la velocidad de convección en el manto que yace sobre la placa en subducción, de la fuerza de fricción entre las placas, y de los efectos de las reacciones químicas y de los fluidos circulantes en la placa subducente y en la cuña de prearco suprayacente.

El refinamiento de los modelos acometido por Fryer y yo mismo nos ha permitido descubrir que las condiciones reinantes en buena parte de la región del prearco favorecen el metamorfismo de las rocas del manto para minerales de las facies de los esquistos azules y esquistos verdes (una familia de minerales emparentados), que se forman a temperatura y presión entre bajas y moderadas. Estos modelos dan, pues, credibilidad a la hipótesis de la esponja metamórfica.

Si existe tal esponja para absorber los fluidos de la corteza en descenso, ¿de qué está compuesta? El principal tipo de roca que hay en el manto del prearco es peridotita, rica en mineral olivino. Bajo las condiciones de temperatura y presión prevalecientes en el prearco de las Marianas, el olivino reacciona con el agua para formar serpentina, un mineral de tipo amianto.

Esta transformación expande el volumen de la peridotita, que, metamorfoseada, se vuelve menos densa que el manto envolvente. Entonces, pueden ascender grandes gotas de serpentina a modo de diapiros, observación ésta que liga directamente teoría y modelos con lo hallado por nosotros en el lecho oceánico.

En el transcurso de varias campañas de geología marina realizadas en las postrimerías de la década de los setenta y principios de la siguiente, James W. Hawkins, de la Institución Scripps de Oceanografía, su alumno Sherman Bloomer, hoy en la Universidad de Boston, y la autora recogieron muestras por dragado en más de 40 puntos de los montes submarinos del prearco de las Marianas. Bloomer observó que la composición de los elementos traza de las muestras más frescas de peridotita era similar a la de los magmas de los arcos insulares. Y aventuró la idea de que el crecimiento del arco insular volcánico, suprayacente a la zona de subducción, había generado probablemente la mayor parte de la región del prearco.

Trenzó entonces una hipótesis sobre la naturaleza de los montes submarinos: la subducción en la fosa de las Marianas (que comenzó hace unos 45 millones de años) habría causado una erosión tectónica capaz de destruir de 50 a 60 kilómetros del prearco. Esta erosión, a su vez, habría producido fallas de tensión en el prearco (suposición posteriormente confirmada mediante estudios de reflexión sísmica). Porque la serpentina se deforma fácilmente si se la somete a un esfuerzo, Bloomer concluyó que los montes submarinos eran diapiros de serpentina que habían ascendido a lo largo de las fallas.

El análisis de muestras de serpentina procedentes de varios montes submarinos en el prearco de las Marianas aporta pruebas circunstanciales

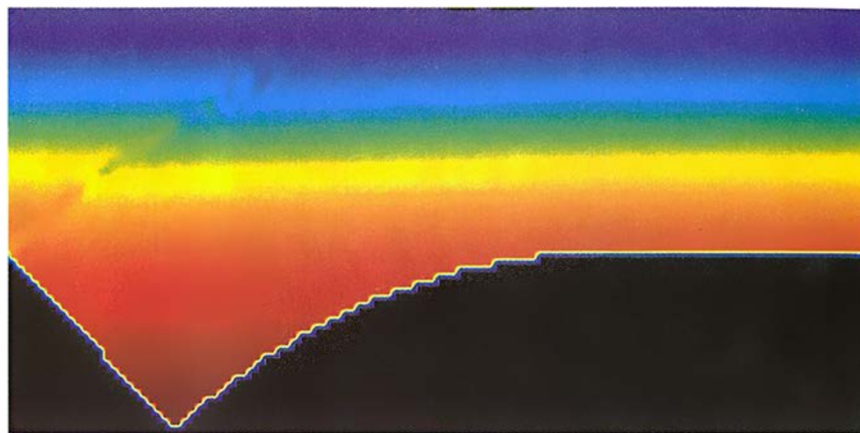
del metamorfismo generalizado del frente (cuña) del prearco, así como de la posibilidad de diapirismo. La composición de las rocas y el tipo de metamorfismo que han sufrido varían sólo ligeramente, señal de que el manto del prearco en su conjunto había alcanzado, muy al comienzo de su historia, una vasta región donde las condiciones eran favorables para un metamorfismo que se desarrollara a temperatura y presión moderadas.

Pero una de las muestras dragadas reveló sin ambages que el panorama era más complejo que el mero ascenso de diapiros de serpentina líneas de falla arriba. Cierto dragado de 1981 en un monte submarino de la parte más meridional del prearco incluía una roca carbonatada blanca, dotada de textura muy poco común; le pedí a mi compañera Janet Haggerty que investigara las muestras. Descubrió que el carbonato contenía aragonito, un mineral inestable a la profundidad a la que se había recogido la muestra. A esas profundidades y temperaturas del agua, el aragonito debería haberse disuelto antes de un año.

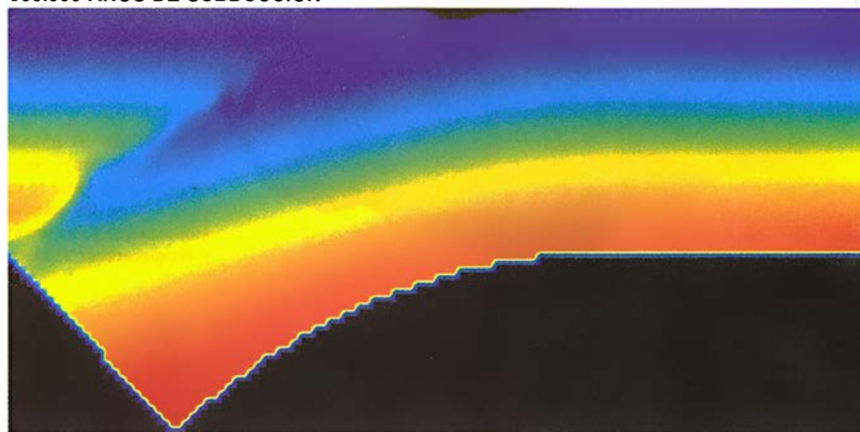
Haggerty observó, además, que la muestra estaba acribillada de agujeritos rodeados de cristales de aragonito y de calcita. Atribuyó la formación de los cristales al paso de fluidos a través de los conductos. La composición y las relaciones isotópicas de carbono y oxígeno de las muestras indicaban que el fluido con el que habían estado en equilibrio no era agua marina. Creyó Haggerty que tenía ante sí fragmentos de chimenea volcánica.

No podían pertenecer a humeros negros, la suerte de chimeneas cuya fama surgió de la exploración de los sistemas hidrotermales de las crestas de las dorsales centro-oceánicas. Más que formarse a partir de exhalaciones de agua marina caliente que circulara en las cercanías de las cámaras magmáticas de las cimas de las dorsales, estas chimeneas carbonatadas se erigieron, a buen seguro, por la filtración lenta de fluidos relativamente templados a través de fracturas en el prearco de las Marianas. ¿Podían esos fluidos haber derivado de la placa Pacífica en subducción? Si la salida, a través de conductos

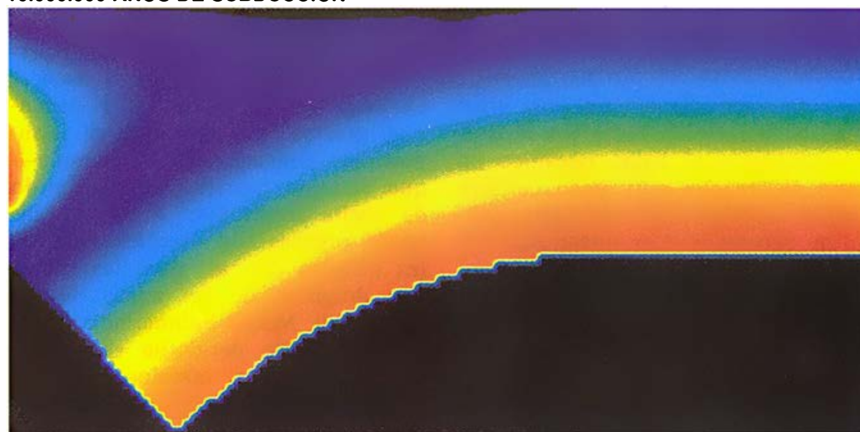
100.000 AÑOS DE SUBDUCCION



900.000 AÑOS DE SUBDUCCION

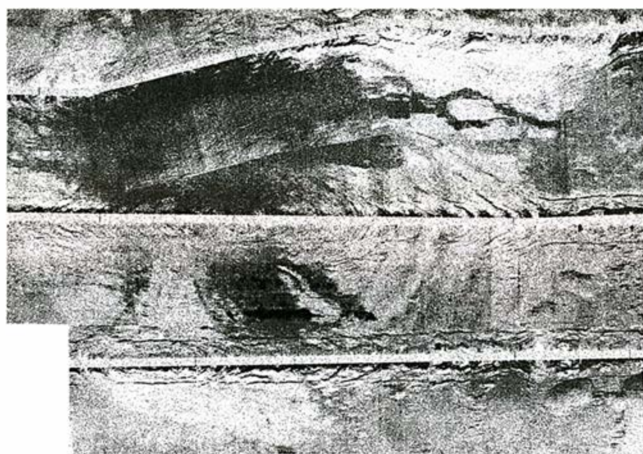


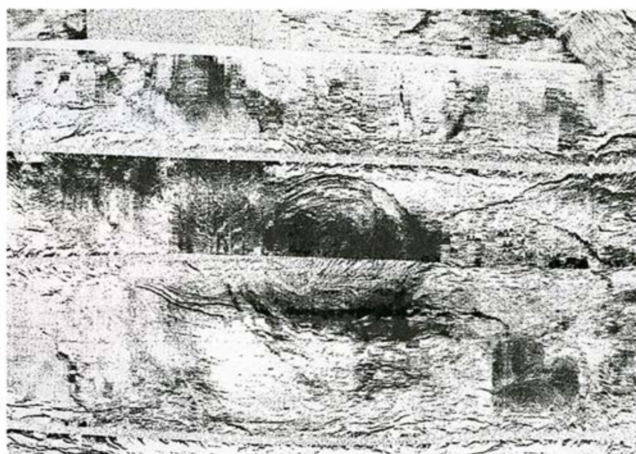
10.000.000 AÑOS DE SUBDUCCION

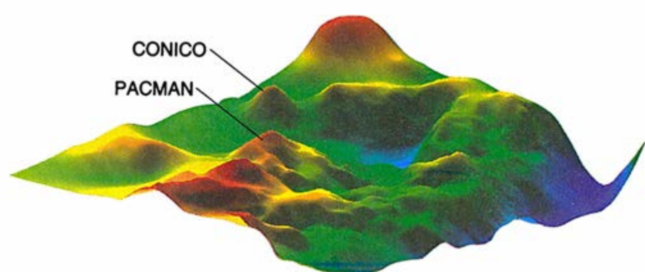




3. PLACA DEL PACIFICO EN SUBDUCCION: enfría la región del manto en la que penetra (*los tres recuadros superiores*). Las condiciones de presión y temperatura en la región de las Marianas favorecen el metamorfismo de esquistos azules y verdes (llamados así por las familias de rocas que generan).







4. MONTES SUBMARINOS estudiados por medio de sonar de barrido lateral (sidescan) y sondas profundas; nos aportan pruebas de la presencia de estructuras que se suelen interpretar como coladas lávicas. Sin embargo, en este caso las coladas no son de lava sino de serpentina, un mineral de amianto que se forma cuando la peridotita reacciona con el agua a presiones y temperaturas moderadas.

activos, de fluidos relacionados con la subducción constituyera un fenómeno habitual del lecho oceánico, en asociación con fracturas o diapiros de serpentina, esa emisión ayudaría todavía más a equilibrar el régimen de los fluidos de las zonas subducentes.

Así las cosas, sabíamos muy poco de la relación entre los montes submarinos y el lecho oceánico en torno al prearco; muy poco también de las características de cada monte en particular. Las cuestiones relativas al origen, estructura y composición de tales montañas sólo podíamos abordarlas mediante la cartografía de alta resolución del suelo oceánico.

En 1983, dos años después de la campaña en la que habíamos recogido aquella singular muestra carbonatada, rastreamos mediante sonar el prearco exterior de las Marianas. Hallamos dos montes submarinos de serpentina; uno parecía un bloque que se hubiera roto por una falla en su vertiente este y hubiera dado origen a una estructura en cuarto creciente. La morfología del otro se acercaba a la de un cono, con un perfil similar al de los volcanes de escudo basálticos (los de Hawai o de Islandia).

Las imágenes obtenidas por sonar de Monte Submarino Cónico, así bautizaríamos más tarde a la segunda prominencia, muestran varios surcos concéntricos en las faldas inferiores del flanco sureste, reminiscencias de los surcos de presión que pudieran esperarse en un edificio que se deforma bajo su propio peso. Pero los rasgos más espectaculares eran, con mucho, las zonas alargadas, oscuras y sinuosas que cubrían la mayor parte de sus flancos. Las áreas oscuras en estas imágenes de sonar denuncian que se trata de regiones —superficies rugosas, por lo común— que reflejan fuertemente el sonido de vuelta al receptor. A su vez, las zonas rugosas son características de las coladas lávicas; pero las muestras dragadas de las zonas de las coladas de Monte Submarino Cónico contenían sólo peridotita serpentinizada, unos pocos nódulos pequeños de manganeso y algunos sedimentos de serpentina.

El monte en cuarto creciente (le pusimos Pacman de apodo) carecía de estas sinuosidades. A cambio, mostraba una colada grande y oval. Llenaba parcialmente el foso de falla (*graben*) en el flanco este del monte submarino; el dragado de muestras nos proporcionó allí peridotita serpentinizada y algunos sedimentos de serpentina. El dragado del lado sur del *graben* recuperó peridotita serpentinizada de casi idéntica composición que las rocas de la colada.

Acabados los estudios geofísicos, la cartografía del fondo oceánico y el muestreo de reconocimiento, se imponía un trabajo minucioso de campo sobre el fondo marino. Y, así, Foster, Haggerty y la autora se encaminaron hacia el *Alvin*. En el verano de 1987 dirigí un crucero de buceo por el prearco de las Marianas con el fin de explorar Pacman y el Monte Submarino Cónico. Los primeros buceos en el Cónico mostraron que las regiones claras en las imágenes de sonar correspondían a un lecho marino plano, ligeramente sedimentado, en tanto que las estructuras oscuras y sinuosas pertenecían a extensiones rugosas y contorsionadas de lodo verde y cantos de color oscuro: las coladas. Están compuestas de lodo de serpentina no consolidado y grandes cantos de peridotita en varios grados de serpentinización.

Durante el cuarto descenso y después de unas tres horas de explorar el flanco suroeste del Cónico, el *Alvin* se aproximó a la hendidura, relativamente llana, de la ladera sudoeste de la cima. La tarea científica corría a cargo, en esa inmersión, de Debra Stakes, de la Universidad de Carolina del Sur; nos informaba por radio, a medida que se le iba apareciendo, de un campo de chimeneas blancas y fantasmales en las cercanías del centro del corte. Ella y los pilotos pasaron el resto del tiempo que duró el descenso explorando, fotografiando y muestreando “el cementerio”, así llamamos a esa extensión de unos 200 metros de diámetro sembrada de centenares de chime-

neas de carbonato. Las muestras que nos trajo de vuelta consigo eran prácticamente idénticas a las muestras carbonatadas recogidas en 1981 del monte submarino en el prearco sur de las Marianas.

Dedicamos varios descensos de los que nos faltaban para agotar el cupo de la campaña a explorar el cementerio. Las chimeneas de carbonato son delgadas y su altura es generalmente inferior a dos metros. Su superficie, surcada, les confiere un aspecto corroído. Mostraban incrustaciones de carbonato que rellenaban las múltiples microgrietas del suelo oceánico, así como un precipitado carbonatado en la base de los cantos. Pero nadie vio emanación de fluidos en ningún momento del muestreo de esas estructuras en chimenea.

En la periferia del campo se yerguen otras estructuras en chimenea, más gruesas y de hasta algunos metros de altura. Se juntan a veces en una suerte de barbacanas y suelen portar incrustaciones de depósitos negros de manganeso. La cima de una, sin embargo, era de color claro; tenía la superficie lisa, aunque irregular y manchada por pequeñas alfombras bacterianas de un amarillo verdoso pálido. Sospechábamos que se trataba de una chimenea en proceso activo de formación. Tras la recogida de muestras de su superficie, escarbamos en la parte superior de la chimenea para detectar —y muestrear si ello resultara posible— cualquier fluido en emanación que pudiera asociarse a su formación.

Los pilotos del *Alvin* están acostumbrados a habérselas con chimeneas hidrotermales que emiten chorros violentos en cuanto se les abre el tapón superior. Lo que sucedió cuando rompimos éste fue tan sutil que, de entrada, el piloto se mostró reacio a reconocer actividad alguna. Pasados unos minutos, percibíanse ya hilillos de fluido procedentes de la superficie de la chimenea: más que salir a chorro, la emanación fluía.

Medimos la temperatura en el interior de uno de los orificios de la chimenea: era ligeramente inferior (en 0,03 grados C) a la temperatura ambiente del agua marina a esa profundidad. La cristalización de minerales de una disolución constituye una reacción endotérmica (que requiere energía para desarrollarse), y es posible que la precipitación del mineral que edifica la chimenea justifique ese ligero descenso de la temperatura del fluido.

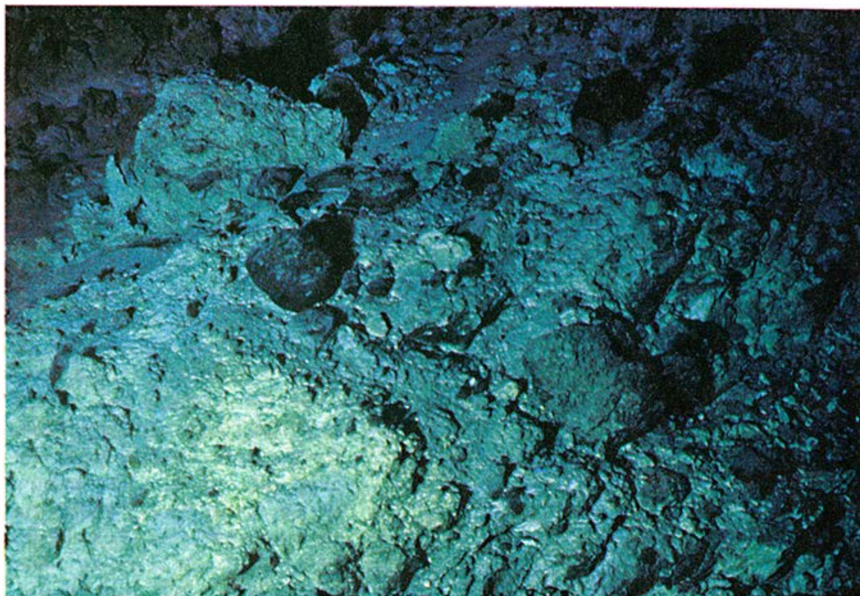
La Verne D. Kulm, de la Universidad estatal de Oregón, y sus colegas habían encontrado ya emanaciones de fluido de baja temperatura y chimeneas de carbonato en el prearco de Oregón en 1986, pero la chimenea de Monte Submarino Cónico era muy distinta. Las chimeneas de la zona de subducción de Oregón no están asociadas a diapiros de serpentina, sino con fluidos exprimidos de una cuña de sedimento acrecionada al prearco desde la placa oceánica.

Además, Haggerty descubrió más tarde que la chimenea que nos ocupaba no estaba compuesta de carbonato. Contiene un mineral hasta ahora desconocido, un silicato de magnesio análogo a la alótana, arcilla de silicato de aluminio. Analizó el contenido isotópico de oxígeno y de carbono de las muestras de carbonato y determinó que las chimeneas, de igual forma que las del prearco sur de las Marianas muestreadas en 1981, se formaron en equilibrio con fluidos distintos del agua marina.

Las muestras de los fluidos que emanan de la chimenea de silicato tienen un *p*H inusitadamente alto, de 9,28 (el *p*H del agua del mar del entorno es de 7,72), y una elevada alcalinidad. Comparadas con el agua del mar, las aguas que fluyen de las



5. ESTRUCTURAS EN CHIMENEA en los montes submarinos de las Marianas; denuncian la fuga de fluidos transportados desde el manto. Las rocas de las chimeneas y los fluidos que escapan tienen trazas químicas que excluyen su procedencia del agua marina.



6. CAMPO DE COLADAS DEFORMADAS en los flancos del Monte Submarino Cónico, resultado del vulcanismo de lodos fríos. La composición de la mayoría de las rocas concuerda con la del lodo, pero algunas proceden de dorsales centro-oceánicas o de islas oceánicas.

chimeneas son 500 veces más ricas en metano, seis veces más en sílice y aproximadamente un 6 por ciento más en sulfato, amén de contener sulfhídrico, del que carece absolutamente el agua marina ambiental. Es muy verosímil que el agua marina se mezclara con las que fluían lentamente durante la toma de muestras, y por tanto estas cifras han de interpretarse como mínimas estimadas.

No se observaron estructuras en chimenea en el monte Pacman; los escarpes de la falla que dejaban a la vista el interior de esa montaña submarina no presentaban coladas, sino tan sólo peridotita serpentinizada maciza. Tras el estudio de los datos, llegamos a la conclusión de que los montes Cónico y Pacman representan dos vías diferentes a través de las cuales las rocas metamorfizadas del manto alcanzan el lecho oceánico. El Pacman pudiera ser muy bien un bloque de peridotita serpentinizada que sufrió un proceso de elevación, bloque similar a gran parte del manto del prearco. Posiblemente se trate de un gran diapiro de serpentina, intacto. La "colada" de su flanco oriental constituye, probablemente, un depósito de corrimiento de serpentina iniciado por la falla que allí formó el *graben*. Sospechamos que el Cónico es un volcán de lodo con un conducto central, por donde se emiten coladas frías de lodo de serpentina, cargadas de fluidos originados en profundidad.

Aunque parecía que las rocas expuestas en la superficie de los montes se elevaron desde zonas profundas a través del prearco, nadie sabía qué tipos de rocas yacían bajo las montañas submarinas. Estábamos ansiosos por muestrear la mayor parte posible del área. De día, descendíamos con el *Alvin*; durante la noche, recogíamos material de un escarpe en el *graben* colapsado, al este de los montes.



7. TESTIGO DE SONDEO de lodo serpentínico (tamaño real), plegado y fracturado repetidamente.

La mayoría de los tipos de rocas recogidas con anterioridad del prearco de las Marianas portan elementos traza que indican (al igual que las peridotitas) que se derivan de una fuente de magma de tipo arco insular. Esa composición está en consonancia con una formación del prearco de las Marianas mediante erosión tectónica, y no por adición aleatoria de escamas de la placa oceánica al prearco. Las muestras de este escarpe de falla de 2000 metros de profundidad apuntan a un escenario diferente.

Lynn E. Johnson, en aquel entonces alumna de doctorado de la Universidad de Hawai, analizó las lavas de las muestras recogidas: algunas no encajaban con las signaturas de magmas de arco, sino con las de basalto de cordillera centro-oceánica y las de los basaltos característicos de islas oceánicas. En un dragado del mismo escarpe se recuperó también sílex, una roca sedimentaria rica en sílice compuesta de radiolarios (organismos unicelulares que segregan sílice). Las edades de los radiolarios revelan que las muestras de sílex tienen más de 95 millones de años, 50 millones más que la propia zona de subducción.

El hallazgo de basaltos de dorsal centro-oceánica, de basaltos de isla oceánica y de sílex en estas muestras obligaba a revisar los modelos preexistentes sobre la evolución de la zona de prearco de las Marianas. Tal vez la corteza oceánica se agregó al prearco y allí permaneció (aunque en íntima asociación con lavas derivadas del arco insular). Pero eso haría poco probable la erosión tectónica de hasta 60 kilómetros de prearco, tal y como proponía Bloomer. Podían haberse emitido, hacia el interior del prearco, lavas similares a basaltos de dorsal centro-oceánica y a basaltos de isla oceánica; pero ese cuadro resulta harto improbable a tenor de lo que sabemos sobre la distribución de las temperaturas y de la composición de los magmas en los prearcos.

La relación entre montes submarinos de serpentina y fragmentos potencialmente acrecionados de placa oceánica no recibían explicación en ninguna de las teorías concernientes al comportamiento de los bordes de placas convergentes. Por eso, la comunidad internacional de geólogos submarinos decidió introducir una investigación sobre los montes de las Marianas dentro del marco general del Programa de Sondeos Oceánicos internacional. En 1989, Julian A. Pearce, de la Universidad de Durham, y la autora encabezaron una campaña de sondeo en la que participaban 27 científicos de 10 países; el lugar de destino: las regiones de prearco de los complejos de subducción de las Marianas y de Izu-Bonin, inmediatamente al norte de la fosa de las Marianas.

Sondeamos flancos y cima del Monte Submarino Cónico. Los testigos extraídos de los flancos, hasta una profundidad de 313 metros por debajo del lecho oceánico, recuperaron una serie compleja de coladas de serpentina. Además de peridotita serpentinizada, contienen fragmentos de basalto de dorsal centro-oceánica metamorfizado; el basalto induce a pensar que los lodos de serpentina pudieron introducirse en un segmento de placa oceánica acrecionada. A mayor abundamiento, los lodos recuperados de los emplazamientos de los flancos exhiben un plegamiento plástico reiterado y cizallamiento sucesivo, lo que sugiere que fueron emplazados por una erupción o por deslizamiento y que el monte submarino probablemente sufrió una importante deformación tras ser depositado.

Michael J. Mottl, de la Universidad de Hawai, analizó el agua contenida en los poros de los lodos. Denunciaba, en parte, un origen ma-

rino, agua marina presente en diferentes proporciones en las coladas someras de los flancos, y, en parte, pertenecer a un fluido distinto que alcanzaba su composición más extremada en los emplazamientos de la cima, cerca de lo que sospechábamos era el conducto del monte submarino. Mottl demostró que las pautas de la composición del agua de los poros, en distintos puntos, eran similares a las pautas de las aguas de los conductos de emisión recogidas en nuestras inmersiones con el *Alvin*, si bien alejándose muchísimo más del agua marina.

Estos datos ponen de manifiesto que las concentraciones relativas de los compuestos y elementos contenidos en estos fluidos no pueden ser sólo la consecuencia de interacciones entre el agua marina y la roca fuente de la serpentina. Los fluidos han de provenir de otra fuente, muy probablemente de la placa sumergida.

El análisis de los minerales de los lodos descubrió varios que pertenecían a una rara familia de los carbonatos básicos hidratados, el grupo sjögrenita. En el continente, estos minerales aparecen en afloramientos de serpentina que se hallan en contacto con el agua. La presencia de esos minerales en los lodos de los montes submarinos evidencia el papel del fluido distinto del agua marina en el proceso metamórfico. Si algunos de estos minerales han de permanecer estables en los lodos, los fluidos originales difusos deben permanecer atrapados en los flujos de lodo durante todo el proceso de emplazamiento y posterior enterramiento.

La composición mineral de los lodos perforados por los sondeos varía de forma sutil con la profundidad, indicio de que el volcán de lodo sufre pulsos de actividad con períodos intercalados de reposo. El Monte Submarino Cónico está emplazado en la intersección de al menos dos fallas principales; tal vez se forme a medida que el movimiento a lo largo de estas fallas tritura la peridotita serpentinizada, convirtiéndola en polvo de roca, que se transporta, hasta la superficie, conforme los fluidos procedentes de grandes profundidades escapan por los planos de falla. Las variaciones en su actividad podrían guardar relación con el movimiento a lo largo de fallas subyacentes, y las variaciones en composición estar relacionadas con el tipo de roca que haya en los focos de las fallas. La datación de sedimentos recuperados asigna a los flujos que sondeamos en el lecho oceánico una edad aproximada de un millón de años; la formación del monte submarino es, pues, reciente.

Ignoramos cuántos volcanes de lodo así haya, cuántos montes submarinos de serpentina que se formen por otros medios y cuántas fracturas del prearco que puedan ser puntos activos de emisión o filtración de fluidos. Sí sabemos con certeza que los fluidos y varios de los componentes introducidos en el prearco, desde la placa sumergida, recorren el camino de vuelta hacia el océano y retornan al ciclo geoquímico marino.

El descubrimiento de volcanes de lodo de serpentina en el prearco de las Marianas y el conocimiento de su origen tienen implicaciones que trascienden el interés de una sola zona de subducción. Los geólogos identifican cada vez más nuevos litosferoclastos (fragmentos de litosfera) expuestos en los continentes y en las islas de las zonas donde colisionan las placas; muchos bloques de ésos encierran grandes masas de serpentina. Masas que presentan una estructura y composición similares a las encontradas por nosotros.

El estudio de la serpentina en litosferoclastos nos permitirá ponderar la importancia ejercida por los diapiros de serpentina y los volcanes de lodo en los prearcos antiguos. Ese conocimiento, sumado a la investigación de los montes submarinos de serpentina modernos, habrá de ayudar a desentrañar de qué modo evolucionaron las zonas de subducción a lo largo de la historia de la Tierra. Además, la comparación de litosferoclastos antiguos del continente con las regiones activas de prearco seguirá contribuyendo al conocimiento de los complejos márgenes continentales en los que esos prearcos llegan a menudo a integrarse.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEAMOUNTS, ISLANDS, AND ATOLLS. Dirigido por Barbara H. Keating *et al.* Geophysical Monograph Series, n.º 43, American Geophysical Union, 1987.

PLUMBING THE PACIFIC SINKS. Leg 125 Shipboard Scientific Party en *Nature*, vol. 339, n.º 6224, págs. 427-428; 8 de junio de 1989.

ODP LEG 125 DRILLS FOREARC CRUST, MANTLE. Leg 125 Scientific Drilling Party en *Geotimes*, vol. 34, n.º 7, págs. 18-20; julio de 1989.

PROCEEDINGS OF THE OCEAN DRILLING PROGRAM, INITIAL REPORTS, vol. 125. Editado por Patricia Fryer *et al.* Texas A&M University, Ocean Drilling Program, 1990.

Invasión de células cancerosas y metástasis

La amenaza más seria del cáncer para la vida es la diseminación inadvertida de las células tumorales por todo el cuerpo. Una mejor comprensión de cómo estas células invaden los tejidos ayuda a plantear nuevos tratamientos

Lance A. Liotta

Supongamos que, en el curso de un examen rutinario, una mujer de 55 años se entera de que en la mamografía aparecen signos de tumoración sospechosa en una mama. Con la ayuda de un microscopio y una muestra de la masa del tejido, un anatomopatólogo puede diagnosticar fácilmente si el tejido es maligno. Más difícil resulta determinar el pronóstico de esa paciente. Depende de un fenómeno celular que no puede observarse directamente: la metastatización, la diseminación de las células malignas por todo el cuerpo que pone en marcha el desarrollo de tumores secundarios.

Cuando el tratamiento de un cáncer fracasa, la metástasis es la causa primaria de muerte. Si un tumor primario se detecta en una fase precoz y se elimina antes de que aparezcan metástasis, el cáncer quedará erradicado. En cambio, si ya han aparecido metástasis, aunque éstas sean microscópicas, el pronóstico es grave. Abandonadas a su suerte, las metástasis crecerán y acabarán con la vida del enfermo.

Aunque la naturaleza ominosa de la metástasis es algo conocido, el carácter complejo del proceso mediante el cual se instaura ha impedido a lo largo de la historia el progreso investigador. Afortunadamente, el análisis tenaz de cada uno de los pasos del desarrollo de la metástasis ha proporcionado una nueva y riquísima información. Uno de los hallazgos más importantes ha sido el hecho de que, en contra de algunas de las primeras hipótesis, la metastatización es un proceso activo y no una consecuencia accidental del crecimiento del tumor. Por supuesto, la invasión de los tejidos sanos por las células tumorales —un paso crítico en el desarrollo de los tumores secundarios— constituye un fenómeno complejo que implica la respuesta combinada de células cancerosas y de células normales.

Nuestro laboratorio, adscrito al Instituto Nacional del Cáncer (NCI), se ha adentrado en el estudio de las bases fundamentales de la invasión del cáncer y del proceso metastático a dos niveles: el de la maquinaria bioquímica de la invasión que opera en la superficie celular, y el de los genes propios de la célula tumoral que hacen posible la metástasis. El enfoque que hemos aplicado conjuga la observación directa del comportamiento de la célula tumoral, la extracción y purificación de las proteínas sintetizadas por las células tumorales y el aislamiento de los genes expresados predominante o exclusivamente en células con actividad metastática alta o baja. Hemos identificado un conjunto de genes y proteínas que parecen regular los aspectos de la invasión y de la producción de metástasis.

Estos descubrimientos nos permiten ahora buscar nuevos tratamientos y adoptar estrategias terapéuticas capaces de detener el crecimiento del tumor antes de que metastatice. Se están desarrollando marcadores nuevos, muy prometedores, que predicen la existencia de metástasis pequeñas antes de que den síntomas. De todo esto habrán de beneficiarse los pacientes de cáncer en los estados iniciales de la enfermedad. Más acuciante, sin embargo, es la necesidad de conseguir técnicas que permitan erradicar los tumores secundarios ya existentes. El esclarecimiento de los mecanismos biomoleculares operativos en el proceso de instauración de la metástasis parece que nos conduce también a la consecución de ese objetivo.

Fue Joseph Claude Récamier, un médico francés, quien introdujo el término "metástasis" en su trabajo *Recherches du Cancer*, publicado en 1829. Fue también él quien aportó los primeros datos anatómicos indicativos de que las metástasis se producen como consecuencia de la penetración de células cancerosas en la circulación, que así viajan hasta lugares distantes del organismo. Antes de Récamier, cirujanos y anatómicos habían reconocido que los tumores podían extenderse más allá de los límites de su ámbito propio de crecimiento local y colonizar tejidos cercanos y ganglios linfáticos, pero estaban convencidos de que las colonias de células tumorales en órganos más distantes tenían un origen independiente. Récamier describió la infiltración local, la invasión de las venas por el tejido canceroso y la aparición de tumores secundarios en el cerebro de pacientes con cáncer de mama.

Sus aportaciones a la biología de la metástasis ocupan su lugar en la historia pero no le llevaron al diseño

LANCE A. LIOTTA dirige el laboratorio de patología adscrito al Instituto Nacional del Cáncer. Da clases en la facultad de medicina de la Universidad de Georgetown. Inició su formación en el Hiram College y se doctoró en 1976 en la Universidad Case Western Reserve, con una tesis sobre un nuevo modelo del proceso metastático del cáncer.

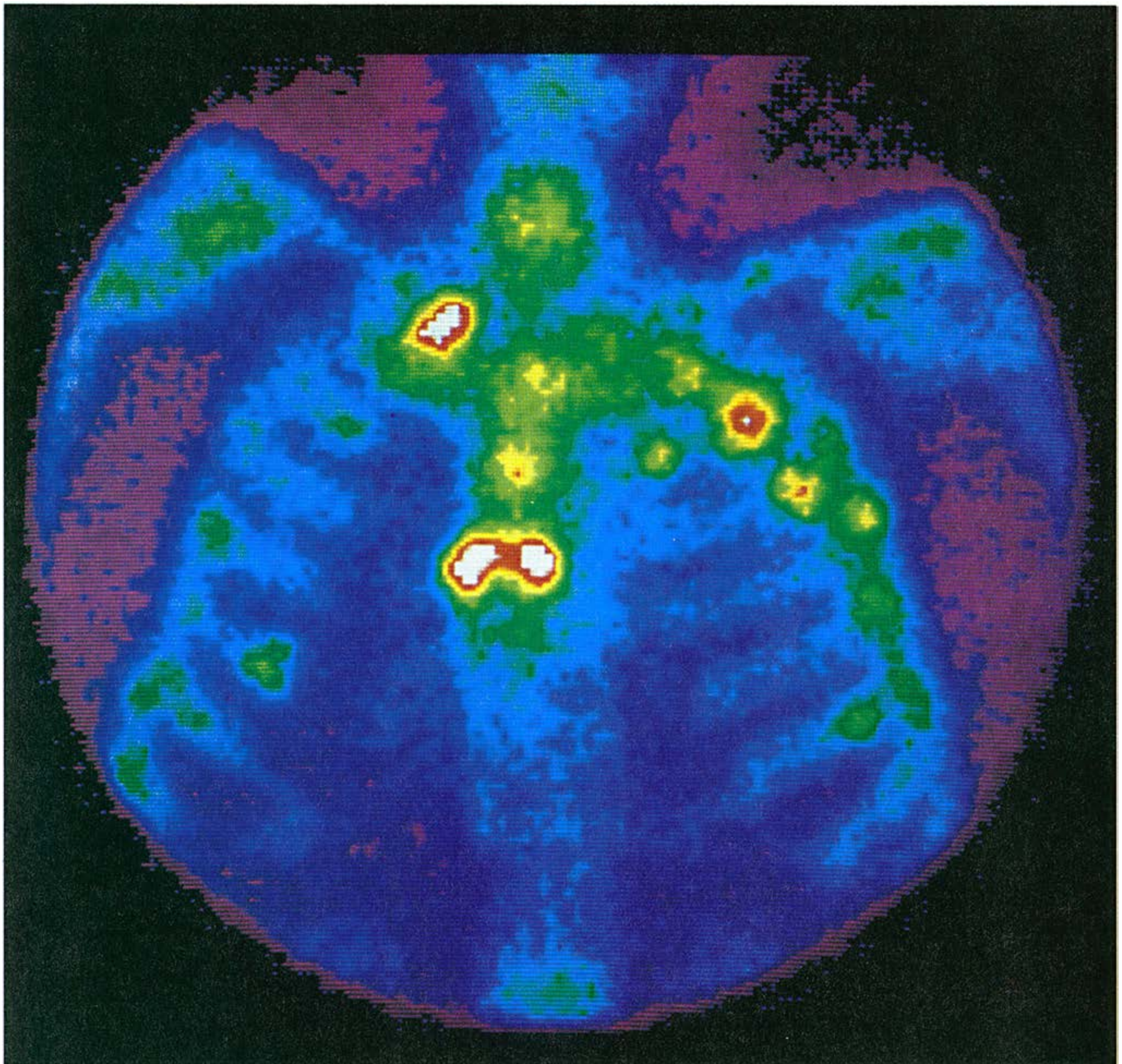
1. METASTASIS, o tumores secundarios, que vemos en esta gammagrafía isotópica en forma de pequeñas "manchas radiactivas" coloreadas (zonas hipercaptantes) sobre un fondo azul en la mama de una paciente con cáncer. Son el resultado del asentamiento de células tumorales que se han separado de la masa primaria y han invadido tejidos más alejados. La ciencia empieza a vislumbrar los mecanismos que permiten a las células emigrar; los expertos se esfuerzan por encontrar medios con que salir al paso de ese proceso.

de tratamientos mejores. Concibió el vendaje compresivo como tratamiento del cáncer de mama —presumiblemente con la idea de frenar la extensión del tumor. Hoy sabemos que ese procedimiento facilitaría más bien el vertido de células cancerosas a la circulación. Afortunadamente, el tratamiento por compresión nunca llegó a hacerse popular.

Estudios más recientes sobre las metástasis han puesto de manifiesto que se trata de una dura carrera de obstáculos con múltiples etapas en la que sólo un pequeñísimo porcentaje de las células que abandonan el tumor primario —menos de una de cada 10.000— consiguen sobrevivir y dar lugar a nuevas colonias del tumor. La competición comienza cuando las células tumorales abandonan el tumor primario infiltrándose a través de las paredes de los canales en el sistema circulatorio vascular o linfático. Los tumores provocan la formación de nuevos vasos sanguíneos (proceso que recibe el nombre de angiogénesis) para nutrir la masa de rápido crecimiento expansivo. Los vasos sanguíneos recién formados en el tejido tumoral son algo más permeables, lo que permite que las células malignas pasen a través de sus paredes con bastante facilidad. Cualquiera de las ramificaciones del árbol vascular dentro de la masa tumoral es un lugar en potencia para el vertido de células a la circulación.

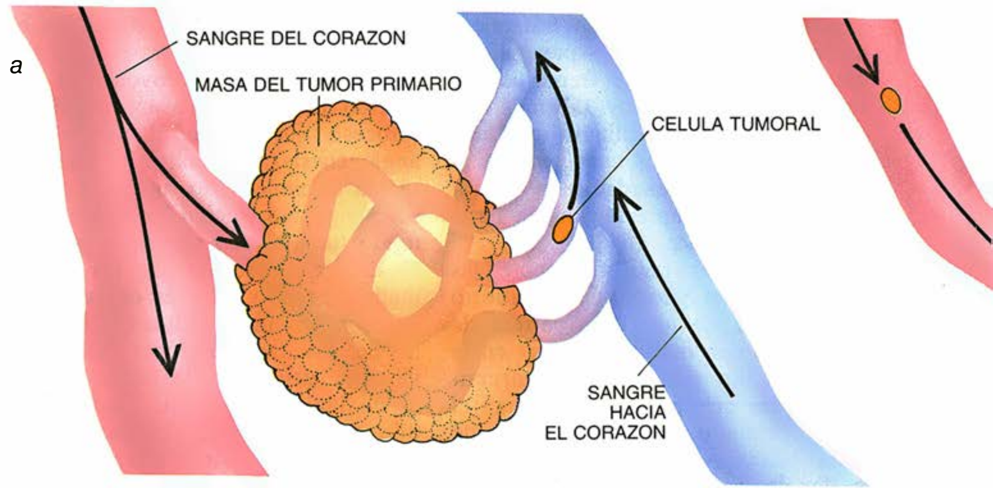
Los vasos linfáticos son puertas de entrada para las células malignas, aunque los tumores no promueven la generación de una red linfática propia. Como los vasos linfáticos drenan de ordinario el exceso de líquido entre las células, la carencia de linfáticos en los tumores podría contribuir a una elevación de la presión hidrostática en el interior de la masa tumoral, como demostró Pietro Gullino, del Instituto de Anatomía Patológica de Turín. Esta presión interna podría dañar el tumor y representar una ventaja para el huésped al ocluir canales vasculares y dejar zonas de la masa tumoral desprovistas de oxígeno y nutrientes. La ausencia de linfáticos en el interior del tumor significa también que las células cancerosas pueden penetrar en el sistema lifático sólo en la interfase entre el tumor y los tejidos circundantes.

Las células tumorales aprovechan la circulación sanguínea o linfática



Así se disemina el cáncer

La metastatización es un proceso de varias etapas a través del cual las células tumorales colonizan órganos distantes. Las células comienzan por desprenderse de la masa del tumor primario y penetran en los vasos sanguíneos que la nutren (*a*). Viajan por la sangre hasta que se alojan en un lecho capilar. Las células que sobreviven hasta el final de ese viaje, pueden abrirse paso a través de la pared del vaso, invadir los tejidos circundantes y empezar a proliferar (*b*). La nueva masa tumoral provoca la formación de nuevos vasos sanguíneos (*c*), que pueden llegar a constituir puntos de partida de nuevas células metastatizantes.

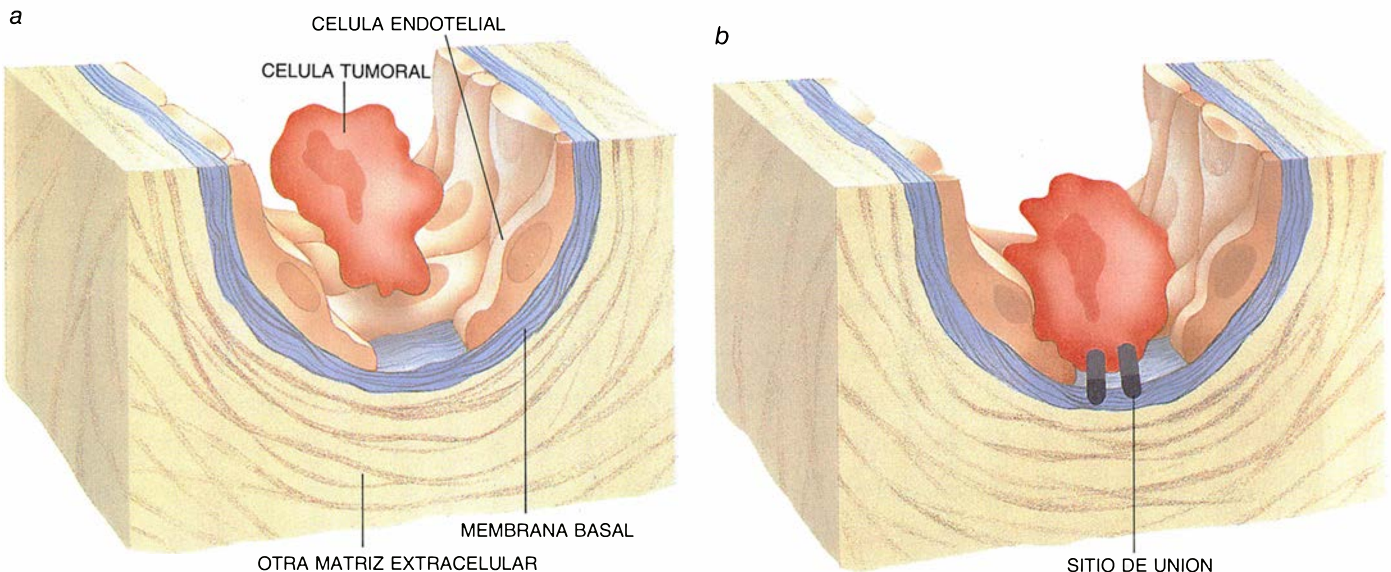


hasta que, llevados por la corriente, encallan en un lecho capilar o en un ganglio linfático, ya sea obstruyendo uno de los vasos estrechos o adhiriéndose al revestimiento interior de un vaso. En la mayoría de los casos, una célula potencialmente metastática pasa por el corazón antes de encontrar su lugar de asentamiento. Si se toma en consideración exclusivamente la anatomía del sistema circulatorio, puede predecirse el lugar en que harán su aparición el 60 por ciento de las metástasis provenientes de un tumor primario. Por ejemplo, los pulmones son lugar frecuente de metástasis para muchos cánceres, porque el corazón bombea toda la sangre a través de sus capilares antes de enviarla a cualquier otro sitio del organismo. Las metástasis del cáncer de colon aparecen con frecuencia en el hígado, porque el hígado recibe directamente la sangre venosa procedente del intestino grueso.

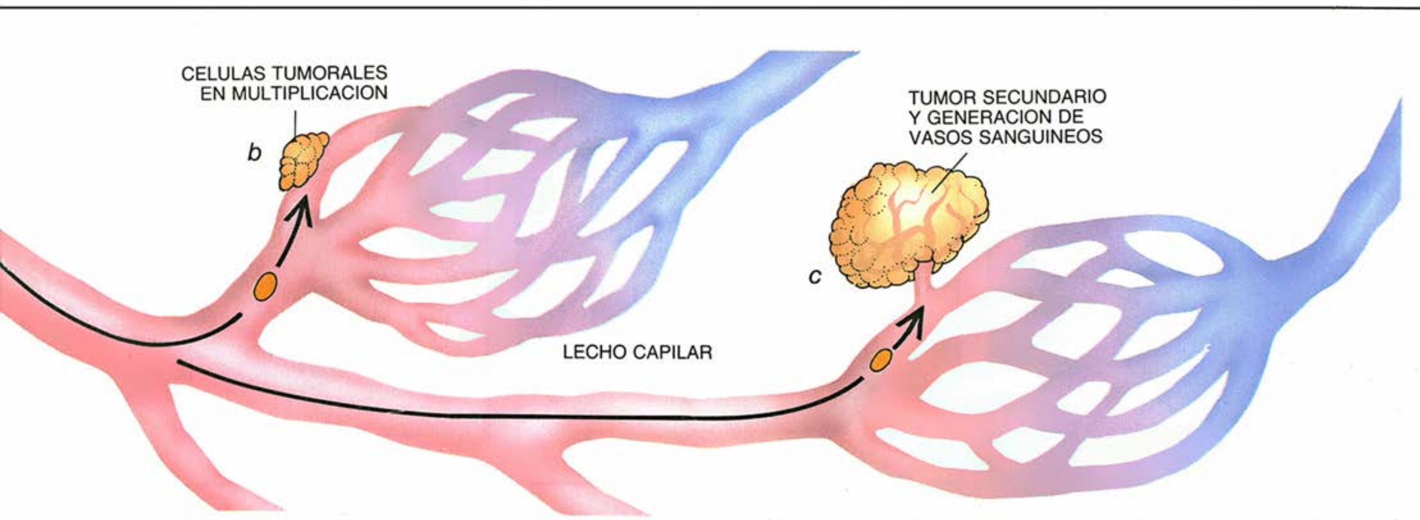
Cuando las metástasis surgen en otros órganos distintos de los que cabía esperar, se debe de ordinario a que las células del tumor han encontrado un "suelo" especialmente apto para su supervivencia y crecimiento. El ambiente favorable de esos órganos puede incluir hormonas o factores promotores del crecimiento que estimulan de manera selectiva las células tumorales. El gradiente de concentración de ciertas proteínas que emanan de los órganos podría ejercer un efecto de atracción sobre las células tumorales e inducirles a salir de la circulación.

La inmensa mayoría de las células tumorales que se detienen en los capilares o en los ganglios linfáticos mueren víctimas de la turbulencia mecánica de la circulación o como consecuencia de los ataques de las defensas del huésped. Transcurridas entre ocho y 24 horas, sin embargo, algunas células tumorales, pocas, que han conseguido sobrevivir comienzan a invadir la pared del vaso y acaban por fin fuera de la circulación.

No todas las células tumorales que penetran en un órgano sobreviven y crecen. Sólo las que comienzan a proliferar iniciarán una nueva colonia. Son diversos los estímulos que pueden promover la proliferación, y entre ellos se encuentran factores de crecimiento locales, hormonas segregadas por el huésped y factores de crecimiento autoestimulantes producidos por las mismas células tumorales. Una colonia metastática incipiente llegará a expandirse en el caso exclusivo de que la angiogénesis del tumor asegure el aporte de nutrientes. El tumor secundario totalmente



2. LLAMASE INVASION al proceso complejo que permite a las células tumorales salir de la sangre y establecer metástasis en los tejidos. Como preludio de la invasión, una célula tumoral provoca la retracción de las células endoteliales que revisten los vasos sanguíneos, exponiendo la matriz de proteínas que constituyen la membrana basal (*a*). La célula tumoral se adhiere entonces a la membrana basal mediante uniones a ciertas molé-

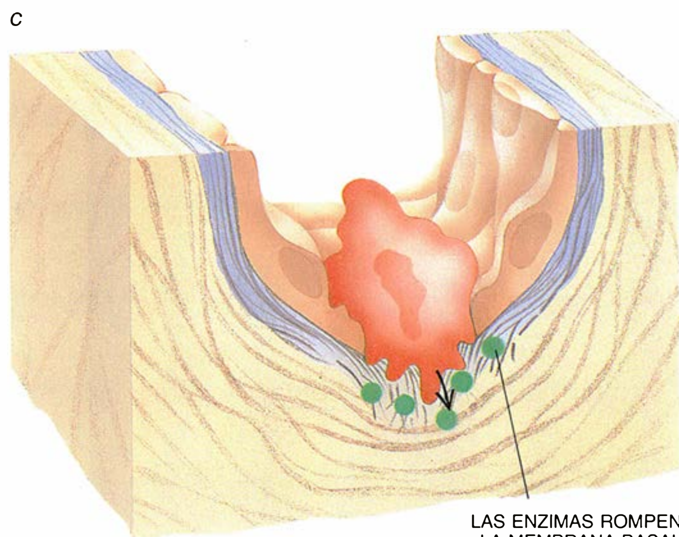


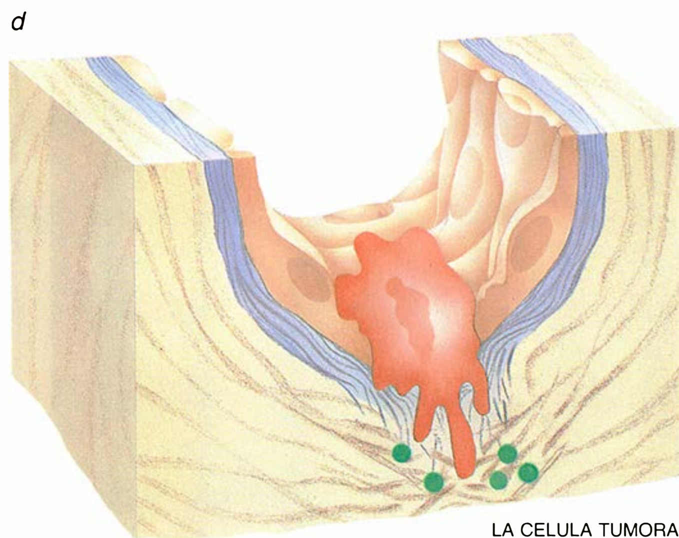
desarrollado tendrá entonces su propio suministro vascular y podrá así constituirse en nueva fuente de células tumorales circulantes. Por tanto, las colonias metastáticas pueden dar origen a su vez a nuevas metástasis y acelerar de este modo el empeoramiento del paciente.

En varios momentos del proceso metastático —durante la entrada en la circulación, durante la salida de la circulación a través de la pared vascular y durante la penetración en el tejido normal circundante—, las células tumorales deben poner de manifiesto sus propiedades invasivas. Hasta finales de los años setenta, debatíase si la invasión de la célula cancerosa era mera consecuencia de la presión en el interior del tumor a medida que éste crecía y a la tendencia disminuida de las células tumorales a permanecer unidas entre sí [véase "Fibronectinas", por Richard O. Hynes; INVESTIGACION Y CIENCIA, agosto de 1986]. Vista así la invasión, como un proceso pasivo, sería la propia presión del crecimiento la que empujaría las células hacia la circulación, donde se produciría su disociación y diseminación. Esta teoría, sin embargo, no puede explicar cómo algunos tumores benignos (como el leiomioma de útero) crecen hasta alcanzar un gran tamaño y producir una elevada presión interna y, en cambio, no invaden los tejidos adyacentes y no dan lugar a metástasis.

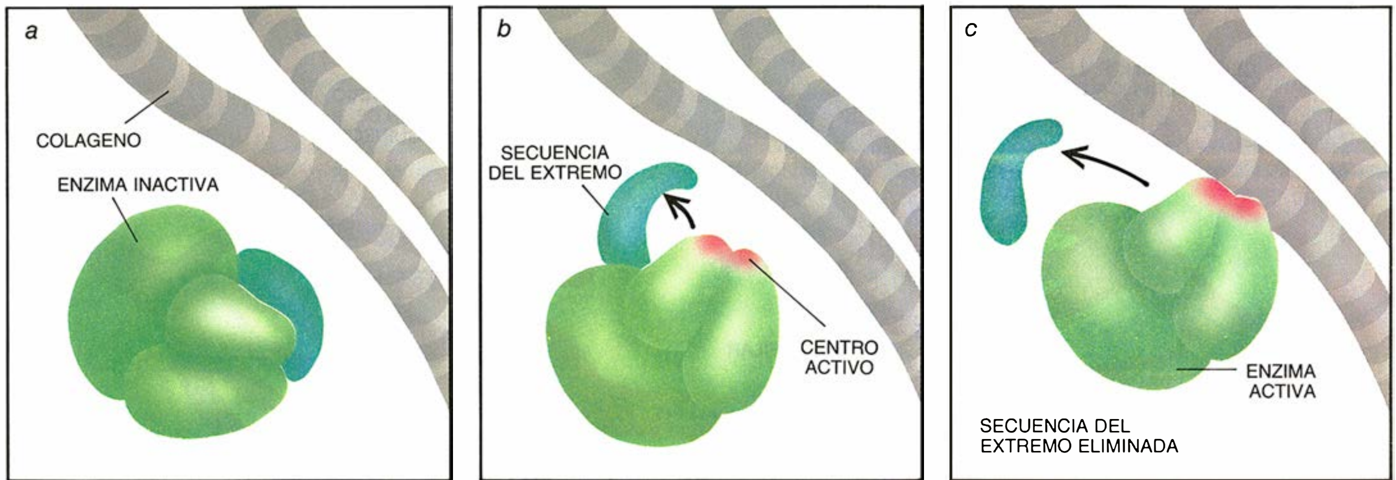
Nuestro grupo dedicado al estudio de la metástasis en el NCI se propuso comprobar experimentalmente la hipótesis del crecimiento-presión. Comenzábamos por tratar las células metastáticas del tumor con un agente que bloqueaba su capacidad de dividirse, y analizábamos entonces su capacidad migratoria e invasiva a través de las barreras de los tejidos. El bloqueo del crecimiento no tuvo ningún efecto sobre el resultado. Llegamos a la conclusión de que no se requiere la presión del crecimiento tumoral para empujar las células y ayudarlas a cruzar la barrera. La invasión tumoral es decididamente un proceso activo.

La malignidad, la potencialidad de un tumor para dar metástasis, requiere la invasión. El patólogo puede identificar esta propiedad examinando una muestra de la zona limitante del tumor. Un tumor benigno, que carece de propiedades invasivas, tiene un borde característico, resultado de la compresión y del desplazamiento del tejido adyacente. Un tumor maligno, por el contrario, posee





culas de ésta (*b*). Las enzimas segregadas por la célula rompen las proteínas de la matriz y abren un agujero en la membrana (*c*). La célula tumoral avanza hacia ese poro, mientras continúa produciendo enzimas que le permiten adentrarse en las capas del material extracelular más allá de la membrana basal (*d*) hasta que termina por introducirse en los tejidos. (Dibujos realizados por Dana Burns-Pizer.)

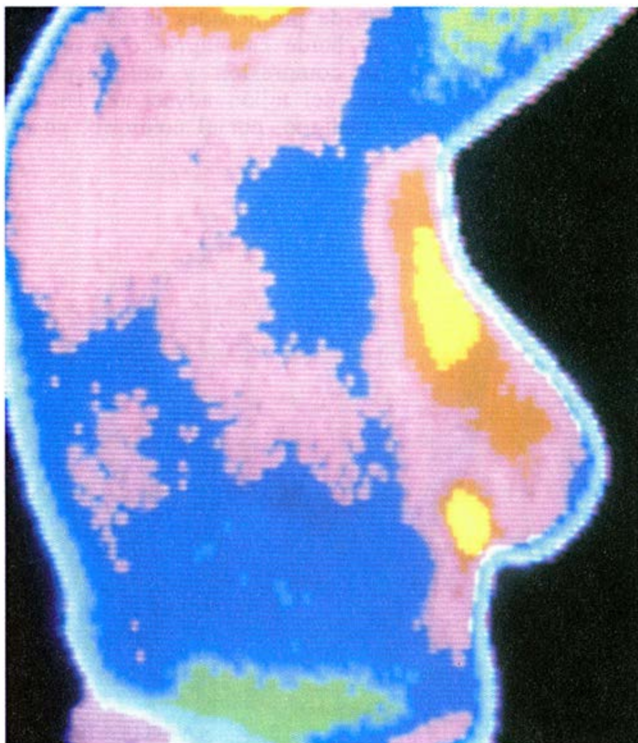


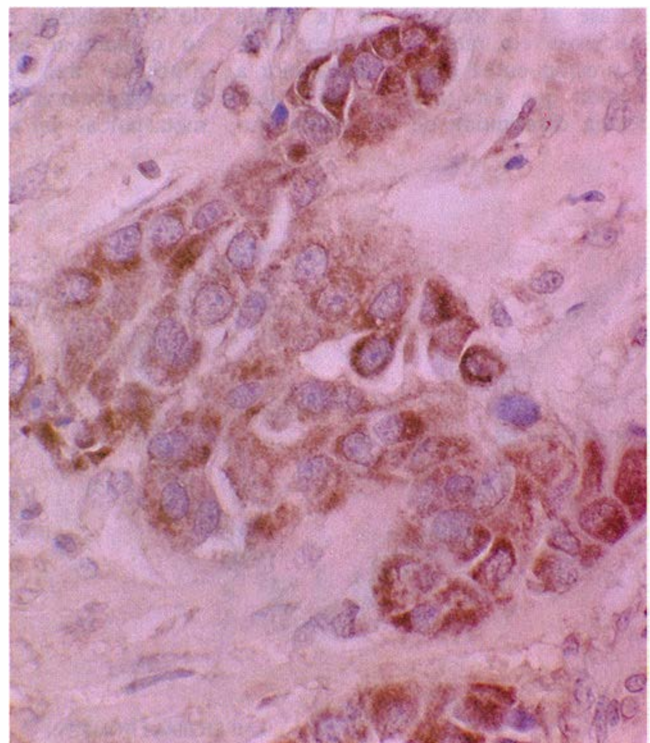
3. LAS METALOPROTEINASAS son enzimas segregadas por las células tumorales que desempeñan un papel esencial en el proceso de invasión. Las metaloproteinasas comienzan inactivas, porque un extremo de la molécula obstruye el centro activo de la enzima (*a*). Sin embargo, en el momento en que se necesita la enzima, la secuencia peptídica del extremo sufre un desplazamiento y queda desgajada (*b*). Con su centro activo ya

límites muy poco definidos, que dan lugar a una zona difusa que se conoce con el nombre de borde de invasión y es precisamente ahí donde las células abandonan de manera activa la masa primaria. En los complicados fenómenos bioquímicos que se desarrollan en el borde de invasión participan ambas células, las tumorales y las del huésped.

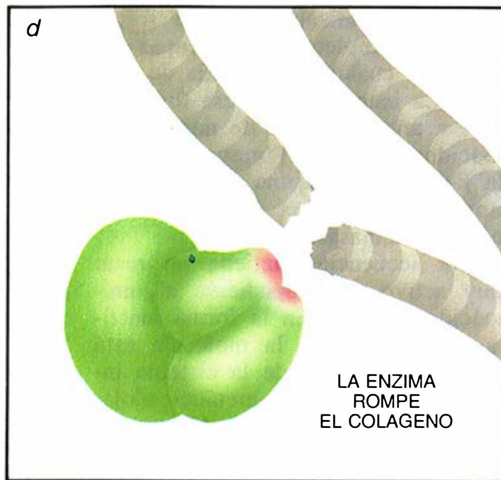
Para entender bien el mecanismo de la invasión hace falta valorar la existencia de las barreras físicas que se interponen entre las células tumorales circulantes y los tejidos extravasculares. La primera barrera es la capa de células endoteliales que revisten el interior de vasos sanguíneos y linfáticos. Los experimentos de Garth Nicholson en el Hospital M. D. Anderson de Houston han demostrado que las células tumorales poseen una afinidad adhesiva especial por la superficie del endotelio. La adherencia de las células tumorales a la capa del endotelio provoca la retracción de éste y como consecuencia queda expuesto el tejido subyacente. De este modo la célula tumoral recluta las células normales del endotelio para que cooperen con ella durante el proceso de invasión.

La barrera situada debajo de las células endoteliales, la matriz extracelular, es más abigarrada y se requiere una mayor dosis de ingenio para superarla. La matriz es un entramado denso de diversas moléculas de proteínas e hidratos de carbono. En el organismo de los mamíferos, vallas de matriz extracelular dividen





4. MAMOGRAFIA (*izquierda*) que evidencia la existencia de un proceso tumoral, pero no puede revelar las causas bioquímicas de la metástasis. En un corte de tejido tumoral (*derecha*), los anticuerpos contra las metaloproteinasas provocan que ciertas células invasivas aparezcan en marrón.



expedito, la metaloproteinasa se une a una molécula de colágeno en la matriz extracelular (*c*) y la escinde en fragmentos (*d*).

los tejidos en una serie de compartimentos. Una forma especializada de la matriz es la membrana basal, que recubre vasos sanguíneos, células musculares y el sistema nervioso. Junto a la membrana basal existe otro tipo de matriz, el estroma intersticial que engloba otras células del tejido y vasos linfáticos.

La matriz extracelular actúa en parte como un andamiaje para el crecimiento de los tejidos. Proporciona una permeabilidad selectiva para el transporte de proteínas y otras moléculas entre las células a través de las paredes de los vasos sanguíneos y durante la filtración renal. Más aún, la matriz extracelular sirve también de barrera mecánica frente a la invasión de la célula tumoral.

Normalmente, las poblaciones celulares de ambos lados de la matriz extracelular no se mezclan entre sí, ni siquiera durante la cicatrización de una herida ni cuando se desarrollan los órganos del embrión. Las células malignas, sin embargo, atraviesan fácilmente la matriz extracelular, cruzan las fronteras de los tejidos y acaban en un lugar que les es ajeno. La rotura de las membranas basales constituye una señal característica del borde de invasión en todo cáncer humano. Una definición de "orden social" de la célula tumoral metastática es su tendencia a disgregar las fronteras de la matriz extracelular y mezclarse con células de tipos diferentes de las que se encuentran en el lecho del tumor original.

La membrana basal continua que rodea los vasos sanguíneos no contiene ordinariamente poros o canales cuya luz posibilite el tránsito pasivo por ella de las células tumorales. Las células de un tumor metastatizante deben, por tanto, encontrar otra vía de penetración en la membrana basal para escaparse de la circulación. Con el propósito de estudiar este proceso, mis colaboradores y yo extrajimos membranas basales de tejidos animales. Cuando las células metastáticas del tumor se colocaron sobre las membranas basales aisladas, se unieron a ellas con avidez. Por debajo de las células tumorales a las que se habían unido, se formó una zona de lisis donde se fragmentaron las proteínas de la membrana basal. Finalmente, las células tumorales penetraron a través de la región de la membrana basal alterada.

Con estos resultados llegamos a la conclusión de que la invasión de la membrana basal seguía un proceso de tres pasos. El primer paso era la adhesión de la célula tumoral a la membrana basal. La adhesión está mediada por receptores específicos en la superficie de la célula tumoral que reconocen ciertos componentes de la membrana basal. El segundo paso consistía en la activación de enzimas destructivas que escindían o desenredaban moléculas de la membrana basal situadas por debajo mismo de la célula tumoral. El tercer paso estribaba en la introducción de pseudópodos, que la misma célula tumoral emitía, en la zona de lisis, a lo que seguía la emigración de la célula tumoral completa.

Estos tres pasos de la invasión de la célula tumoral —adhesión, modificación enzimática de la membrana y emigración— deben estar perfectamente coordinados y sincronizados. A medida que avanza el frente de la superficie celular tumoral y activa las enzimas destructivas para romper las moléculas de las proteínas que obstruyen su paso, la retaguardia tumoral debe permanecer firmemente asida a la matriz extracelular. Una vez que el camino por delante queda expedito, la célula tumoral debe dejar en suspenso la actividad destructiva de sus enzimas y permitir así su propio avance. Este cambio es necesario, porque, para proseguir en su avance, la célula tumoral invasora debe asirse a la matriz en el sentido de la marcha, contraerse hacia delante y desenganchar cualquier tipo de uniones en su retaguardia. En otras palabras, una célula tumoral invasora debe simultáneamente perforar un túnel, agarrarse a las paredes de ese túnel y autopropulsarse hacia delante.

Este comportamiento tan llamativo no es algo privativo de las células cancerosas metastáticas: de vez en cuando, células normales deben invadir también otros tejidos del organismo. El comportamiento invasivo normal se manifiesta, por ejemplo, durante la implantación de la placenta en la pared del útero y durante la formación de los órganos en el embrión. Los leucocitos circulantes han de atravesar las paredes de los vasos sanguíneos para llegar al lugar de la infección. Se establecen redes de vasos sanguíneos mediante la emigración e invasión de células endoteliales que cruzan las barreras de la matriz extracelular y penetran en regiones de los tejidos que necesitan los nutrientes y el oxígeno que sólo un nuevo sistema vascular puede proporcionar.

En todos estos casos, el mecanismo de invasión que utilizan las células normales probablemente sea el mismo que el de las células tumorales. Existe, no obstante, una diferencia esencial en la regulación de esos procesos: cuando desaparece el estímulo en una invasión normal, las células se detienen. Las células malignas pueden moverse de manera implacable y cruzar las barreras de los tejidos en momentos y lugares que serían totalmente inadecuados para las células normales.

Toda una serie de preguntas acerca de cómo se regulan las células normales y las células tumorales metastáticas nos animaron a mí y a mis colaboradores a buscar los genes y las proteínas característicamente asociados con la invasión. Un resultado sorprendente de nuestros estudios fue que las proteínas reguladoras negativas —las que inhiben el comportamiento invasor de las células normales y cancerosas— podían importar tanto como los factores positivos que promueven la agresividad. Ese descubrimiento nos llevó a proponer la existencia de genes supresores de metástasis: genes que codifican proteínas capaces de suprimir los pasos decisivos conducentes a la implantación de la metástasis.

El concepto de genes con efecto supresor sobre las metástasis está en consonancia con el trabajo reciente de Robert Weinberg, del Instituto Whitehead, y Bert Vogelstein, de la Universidad Johns Hopkins, en el que demuestran el interés de los genes que suprimen el crecimiento de las células cancerosas. Weinberg y Vogelstein han propuesto que la pérdida o la mutación de ciertos genes reguladores, piénsese en el gen p53 y el gen retinoblastoma, conducirán a un crecimiento anormal, descontrolado, lo que representa el paso pri-

mero en el desarrollo de un cáncer. El siguiente paso crítico será la transición del tumor de su fase de mero crecimiento a la de invasión y metástasis.

Durante esa transición, algunos acontecimientos genéticos hacen que las células tumorales aumenten la síntesis de proteínas que estimulan la migración y la de enzimas que degradan la matriz extracelular. Esas mismas células podrían detener la expresión de proteínas supresoras de metástasis que suelen bloquear las células de los tumores benignos y evitan que se conviertan en metastáticas.

Para identificar las enzimas implicadas en la invasión, hemos comparado las enzimas producidas en cultivos de células invasoras metastáticas con las de células de tumores no metastáticos. Hemos hecho uso de líneas de células cancerosas aisladas por Isaiah Fidler, del Hospital M. D. Anderson, quien de manera sistemática ha producido líneas de células tumorales de ratón con propensiones metastáticas diversas. Hemos observado que una tendencia invasora elevada está asociada con una síntesis mayor de metaloproteinasas, una clase de enzimas proteolíticas. Después de ampliar nuestros estudios a cánceres humanos, hemos visto que niveles elevados de metaloproteinasas en los tumores se correlacionan con el desarrollo de invasión y metástasis en cánceres de mama, colon, estómago, tiroides, pulmón e hígado.

Al menos ocho miembros de la familia de genes de metaloproteinasas se han encontrado hasta la fecha. Todas las metaloproteinasas tienen estructuras semejantes, aunque difieren de manera significativa en lo que se refiere al tipo de proteína que hidrolizan. Una proteína importante atacada por las metaloproteinasas es, por ejemplo, el colágeno, una molécula filamentosa constituida por una hélice triple que forma la urdimbre de la matriz extracelular. Una de sus variedades, la que se conoce con el nombre de colágeno de tipo IV, constituye el esqueleto de la barrera representada por la membrana basal. Otros tipos de colágeno son característicos de otros tejidos. Es, por tanto, muy probable que las células tumorales necesiten hacer uso de más de una metaloproteinasa, así como de otras clases de enzimas destructivas, para atravesar las barreras que encuentran a su paso por los tejidos.

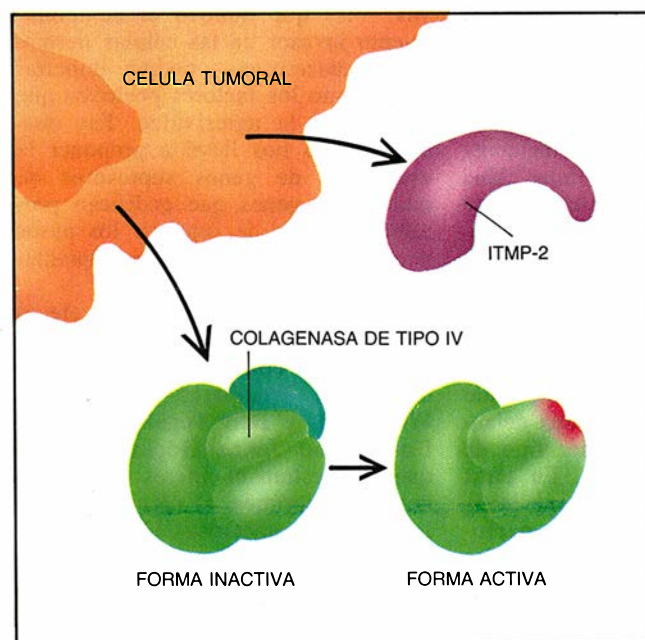
Para demostrar que las metaloproteinasas eran en efecto necesarias para la invasión, tratamos las células tumorales con anticuerpos que bloqueaban selectivamente la actividad de ciertos miembros de la familia de las metaloproteinasas. Los anticuerpos abolían la acción invasora de las células tumorales en nuestras pruebas.

Mucho de lo que ya se sabe sobre la estructura de las metaloproteinasas podrá algún día contribuir al descubrimiento de fármacos que eviten o detengan la invasión y la aparición de metástasis mediante un bloqueo enzimático selectivo. Por ejemplo, sabemos que todas las metaloproteinasas se sintetizan bajo una forma inactiva completamente incapaz de hidrolizar cualquier molécula de proteína. La inactividad de esa forma se debe a una secuencia de nueve aminoácidos pertinaz ("muy conservada") y situada en uno de los extremos de todas las moléculas de metaloproteinasas.

Esta secuencia contiene un resto muy activo correspondiente al aminoácido cisteína. En la forma inactiva, el extremo de la molécula está plegado y el resto de la cisteína interacciona con el ion metálico alojado en el centro activo de la enzima. Con su centro activo así bloqueado, la enzima es incapaz de atacar la proteína que constituye su blanco específico. Por tanto, las metaloproteinasas se producen con sus propios inhidores incorporados.

La metaloproteinasa se torna activa cuando la disposición de su molécula cambia y el péptido (o fragmento proteico) que contiene la cisteína se ve forzado a retirarse del ion del centro activo. La misma metaloproteinasa secciona entonces el péptido que lleva la cisteína y se convierte en permanentemente activa. Junto con mis colaboradores hemos estudiado los cambios conformacionales de las metaloproteinasas en muestras de tumores humanos, y nos hemos encontrado con que a través de esos cambios las enzimas adoptan una forma que es plenamente activa.

Esta información sobre el comportamiento de las metaloproteinasas podría encerrar interés práctico. Una





5. INHIBIDORES HISTICOS DE LA METALOPROTEINASA (ITM). Compuestos segregados por las células, interrumpen la invasión al evitar la rotura del colágeno. El ITMP-2, muy eficaz, se une tanto a formas activas como inactivas de la colagenasa tipo IV, enzima metaloproteinasa.

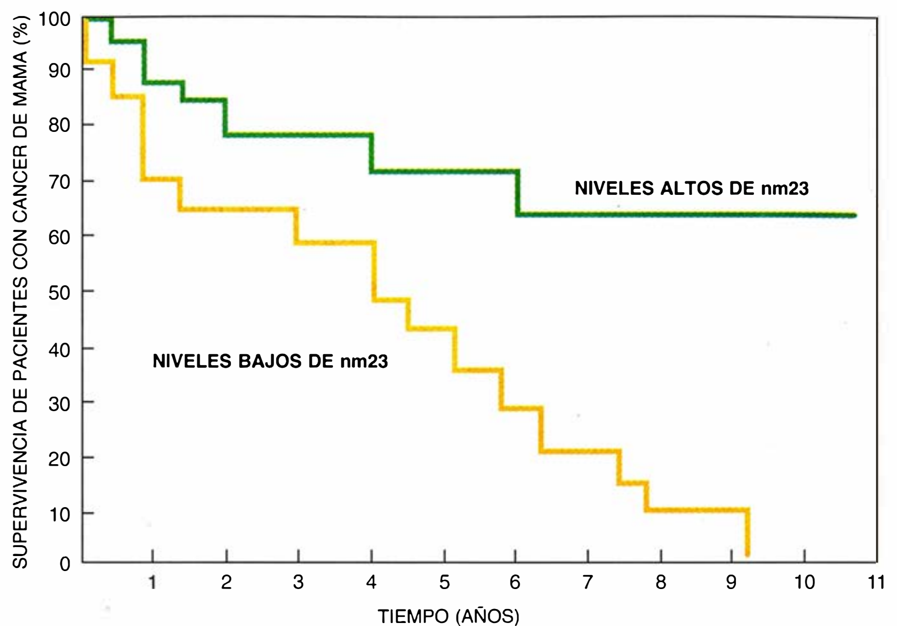
posibilidad muy sugestiva es la de que un fármaco que imite el péptido que lleva la cisteína bloquease la actividad de la metaloproteinasa y, por consiguiente, detuviese o inhibiese la invasión y el desarrollo de metástasis. Sin embargo, quedan todavía cuestiones pendientes sobre qué es lo que dispara los cambios de la enzima.

Cabe la posibilidad de que otros tipos de enzimas degradativas presentes en la célula tumoral activen una metaloproteinasa latente mediante la escisión de su péptido inhibidor. Cabe también, lo acaba de sugerir William G. Stetler-Stevenson, uno de mis colaboradores en nuestro grupo de investigación sobre metástasis, que proteínas inmovilizadas en la superficie de una célula tumoral activen las enzimas. Estas proteínas activadoras de la superficie celular podrían ofrecer a la célula tumoral un exquisito control sobre la actividad local de las metaloproteinasas.

Incluso ya activada, la metaloproteinasa podría fracasar en la hidrólisis de la molécula que constituye su objetivo específico, si está presente un inhibidor tisular de la metaloproteinasa (ITMP). De igual manera que existe una familia de metaloproteinasas, existe también una familia de ITMP, con dos miembros por lo menos: el ITMP-1 original y el nuevo ITMP-2, identificado por Stetler-Stevenson. Ambos ITMP están capacitados para inhibir todas las metaloproteinasas, aunque el ITMP-2 muestre una afinidad especial por la forma latente, o inactiva, de la colagenasa de tipo IV, la metaloproteinasa que escinde el colágeno de tipo IV.

Los ITMP producidos en tejidos normales, tales como cartílago y hueso, podrían desempeñar un papel importante en la defensa de la matriz extracelular de una degradación excesiva. Podrían evitar lesiones en los nervios al proteger la membrana basal que rodea las fibras nerviosas. Los ITMP actúan también como reguladores potenciales del crecimiento celular en vasos sanguíneos y en la médula ósea.

Las células tumorales segregan también ITMP: por ejemplo, muchas células tumorales producen el ITMP-2. La misma célula maligna que sintetiza una metaloproteinasa podría, por tanto, producir un inhibidor de ella. La función de la enzima se pondrá en marcha sólo si el número de moléculas enzimáticas es mayor que el número de moléculas del inhibidor ITMP. Así pues, en este como en otros aspectos de la invasión de la célula cancerosa, el resultado depende del equilibrio entre proteínas reguladoras positivas y negativas.



6. CURVAS DE SUPERVIVENCIA de pacientes de cáncer de mama, donde se refleja la importancia de la proteína nm23, verosímil inhibidor de la metastatización. Las pacientes cuyas células tumorales poseen niveles altos de nm23 tienen metástasis escasas y buen pronóstico. En cambio, las pacientes cuyas células poseen niveles bajos de nm23 morirán antes debido a la aparición de muchas metástasis. Los niveles de nm23 podrían convertirse en indicadores valiosos en los tratamientos del cáncer.

Los ITMP son, por consiguiente, proteínas supresoras de la metástasis. Varios laboratorios han demostrado que el ITMP-1 y el ITMP-2 pueden detener el proceso de la invasión por parte de la célula tumoral. El ITMP-2 puede también bloquear la formación de nuevos vasos sanguíneos que las metástasis en crecimiento necesitan para su nutrición. Estos resultados tan alentadores significan que los ITMP, o fármacos que actúen como ellos, podrían constituir un medio para evitar la invasión o para tratar las metástasis.

Patricia S. Steeg, colaboradora de nuestro grupo de investigación sobre metástasis, ha descubierto recientemente una nueva proteína potencialmente supresora de la metastatización. Al realizar un estudio sistemático para ver las diferencias en actividad genética entre células tumorales metastáticas y no metastáticas procedentes de ratón, Steeg advirtió que, en las metastáticas, faltaba un gen o estaba inactivo. La proteína correspondiente a este gen estaba siempre ausente o al menos sus niveles eran muy bajos en muchas líneas de células tumorales metastáticas; en cambio, abundaba siempre en las células tumorales no metastáticas. Esa proteína recibió el nombre de nm23 (no metastática 23).

Los estudios clínicos realizados por nuestro grupo, Colm Hennesy, de la Universidad de Newcastle, y Narimichi Kimura, del Instituto Metropolitano de Gerontología de Tokio, han concluido que, en una muestra de cánceres primarios de mama, niveles bajos de nm23 se asociaban de manera llamativa con la aparición de metástasis y una supervivencia baja. Y a la inversa, niveles elevados de nm23 se correlacionaban con la ausencia de metástasis y un pronóstico muy favorable para las pacientes. Más aún, en más de la mitad de los casos de cánceres de mama que pudieron analizarse buscando alteraciones genéticas faltaba una de las dos copias del gen nm23. Existe, pues, una correlación muy estrecha entre las alteraciones del nm23 y la transición hacia la invasión y la metástasis. Este mismo patrón se ha observado no sólo en el cáncer de mama, sino también en otros tipos de cáncer.

Si unos niveles adecuados de la proteína nm23 confieren protección frente al cáncer de mama, la determinación de este indicador en dicho tumor podría tener utilidad clínica. Un número significativo de mujeres con cáncer de mama recién diagnosticado no presenta ningún signo de existencia de metástasis. Y, sin embargo, se sabe que entre el 25 y el 30 por ciento de estas pacientes sufren metástasis ocultas demasiado pequeñas para producir síntomas. La determinación de nm23 junto con la de otros indicadores bioquímicos, ob-

jeto hoy de estudio, podrían servir para que los patólogos identificaran las pacientes con riesgo más alto de que tengan metástasis ocultas, y beneficiarse así del tratamiento oportuno.

La proteína nm23 podrá tal vez utilizarse en el futuro como parte del diagnóstico y del tratamiento. Steeg ha conseguido en el laboratorio insertar el gen nm23 en células metastáticas cultivadas, y con ello aumentar la expresión de la proteína nm23. Cuando estas células se inyectaron en ratones no formaron metástasis. Podemos especular con la idea de que si el gen nm23 pudiera introducirse en las células tumorales del organismo mediante alguna terapia genética aún no desarrollada, estaríamos en condiciones de interrumpir el proceso metastático.

¿De qué modo la proteína nm23 inhibe las metástasis? Sabemos que la proteína nm23 ejerce una actividad enzimática que permite unir grupos fosfato a moléculas de proteína. Tales grupos fosfato pueden modificar las actividades de las proteínas, incluidas las de aquellas que regulan señales de crecimiento y la diferenciación. Sabemos también que la célula no segrega la nm23 al exterior. Fuera de eso, seguimos, sin embargo, sin conocer la función precisa de la proteína nm23.

Quizá la función normal de la nm23 llegue a revelarse cuando conozcamos los detalles de su fascinante permanencia a través de millones de siglos de evolución. La nm23 humana es casi idéntica a la *awd*, una proteína de la mosca de la fruta que ha estudiado Allan Shearn, de la Universidad Johns Hopkins. En la mosca de la fruta la *awd* es necesaria para la formación correcta de todos los órganos epiteliales adultos: el cerebro, los ojos, las alas, las patas y los órganos de la reproducción. Por analogía, podemos especular que la nm23 tiene una función importante en la organización normal y en la comunicación entre células humanas. Durante el desarrollo, las células de los tejidos normales se comunican entre sí para producir un órgano con la forma y el tamaño normales. La pérdida de la nm23, o su regulación aberrante, podrían contribuir a crear un estado celular inestable favorecedor del comportamiento autonómico y metastático de las células tumorales.

La predicción y la prevención de metátasis constituyen un objetivo clínico de primer orden. De parejo interés, aunque más urgente, es la erradicación de las metástasis ya establecidas en los pacientes de cáncer. Los estudios moleculares de las vías de comunicación que regulan la invasión y colonización de las células tumorales han permitido a Elise Kohn reconocer la utilidad de una nueva clase de compuestos sintéticos, los carboxiamidoaminoimidazoles (CAI).

Cuando se administran por vía oral, los CAI detienen en animales el crecimiento de metástasis ya establecidas. Como han demostrado Chris Felder, del Instituto Nacional de Salud Mental, y Donald Hupe, de la firma Merck & Co., los compuestos CAI alteran el flujo de los iones calcio hacia el interior de la célula. Nosotros pensamos que este cambio podría velar las señales que estimulan el crecimiento de las colonias metastáticas. Los experimentos realizados en el laboratorio han demostrado que los CAI pueden detener el crecimiento de varios tumores sólidos, incluidos los melanomas (tumores muy metastáticos de las células pigmentarias de la piel), cánceres de colon, mama y próstata.

Cuando este artículo vea la luz, ya habrá dado comienzo un estudio de pruebas clínicas de fase I de este nuevo tratamiento con los CAI en el Instituto Nacional del Cáncer. Es éste un momento apasionante para todos los estudiosos de la metástasis y de la invasión celular. Después de más de siglo y medio de esfuerzo investigador, la ciencia médica puede al fin convertir nuestros conocimientos sobre la metástasis en algo útil para los pacientes. Nunca hubo tantos enfoques para resolver este problema, y nunca se vio tan esperanzador el futuro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CANCER METASTASIS AND ANGIOGENESIS: AN IMBALANCE OF POSITIVE AND NEGATIVE REGULATION. Lance A. Liotta, Patricia S. Steeg y William G. Stetler-Stevenson en *Cell*, vol. 64, n.º 2, págs. 327-336; 25 de enero de 1991.

EXPRESSION OF THE ANTIMETASTATIC GENE nm23 IN HUMAN BREAST CANCER: AN ASSOCIATION WITH GOOD PROGNOSIS. Colm Hennessy, James A. Henry, Felicity E. B. May, Bruce R. Westley, Brian Angus y Thomas W. J. Lennard en *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 83, n.º 4, págs. 281-285; 20 de febrero de 1991.

REDUCED TUMOR INCIDENCE, METASTATIC POTENTIAL, AND CYTOKINE RESPONSIVENESS OF nm23-TRANSFECTED MELANOMA CELLS. Alvaro Leone, Ursula Flatow, C. Richter King, Mary Ann Sandeen, Inger M. K. Margulies, Lance A. Liotta y Patricia S. Steeg en *Cell*, vol. 65, n.º 1, págs. 25-35; 5 de abril de 1991.

Perfiles

Tim Beardsley

DAVID BALTIMORE: *entre la ciencia y la ética*

Cuando David Baltimore fue nombrado presidente de la Universidad Rockefeller en 1990, era la vuelta triunfal de quien, en 1961, había visto denegada su solicitud de cursar allí el doctorado. Pero fue un regreso amargado por la controversia, todavía abierta, sobre la ética de la investigación científica, hasta el punto de que se sintió obligado a dimitir en diciembre del año pasado.

Le entrevisté dos meses antes de que decidiera abandonar el cargo. Sentado en un espacioso sillón junto a una enorme chimenea de piedra, Baltimore se mostraba incómodo en su papel de director bajo sospecha de una decorosísima e ilustre universidad. El estilo neogótico y recargado de la habitación habla, por sí solo, del tipo de lugar que imaginaba John D. Rockefeller Sr. cuando fundó esta institución única de posgrado en 1901. La universidad se dedicó al avance de las ciencias biomédicas, y los 19 miembros y asociados que han sido galardonados con premios Nobel —Baltimore entre ellos— avalan el éxito de su enfoque elitista. Lo mismo que otras, la Rockefeller ha experimentado tensiones, pero, al estilo de las familias de abolengo, los problemas no franquearon las altas verjas que rodean ese enclave circundado de árboles frondosos.

La desazón de Baltimore se amasaba con el rechazo del claustro. Dos tercios de la plana mayor se habían opuesto a su nombramiento en 1990. Cuando yo le visité, la oposición rondaba ya el 85 por ciento.

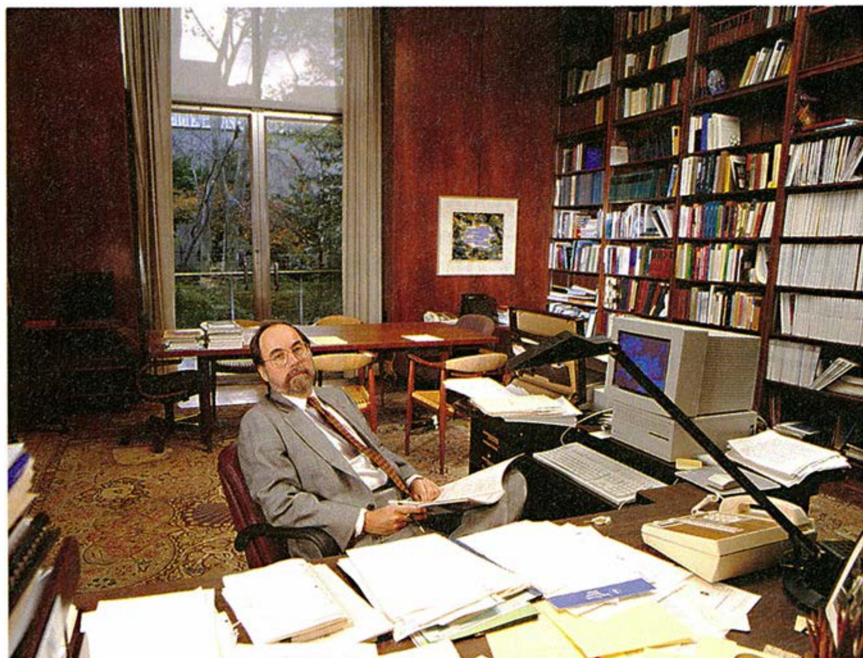
El consejo de administración que le ofreció el cargo en 1989 esperaba revitalizar la institución con una singular estrella del firmamento académico; alguien que atrajera a los jóvenes mejor dotados. Baltimore, de 51 años, reunía todas las condiciones. Había ganado un premio Nobel a los 37 años por el descubrimiento de la enzima transcriptasa inversa; había realizado descubrimientos cruciales en inmunología vírica y molecular. Siendo director del Instituto Whitehead de Investigaciones Biomédicas en Cambridge (Massachusetts), éste adquirió reconocido prestigio internacional en los años ochenta.

Lo que nadie esperaba era la tormenta que se desataría al involucrársele en un pleito de deshonra académica. En 1986, la revista *Cell* había publicado un artículo firmado, entre otros, por Baltimore, David Weaver, de la Facultad de Medicina de Harvard, y Thereza Imanishi-Kari, hoy en la Universidad de Tufts. Según un informe provisional de la investigación llevada a cabo por el Instituto Nacional de la Salud filtrado a la prensa en marzo del año pasado, el escrito se apoyaba en parte en datos falsificados en el laboratorio de Imanishi-Kari, del MIT. Antes de que salieran a luz las pruebas del informe, Baltimore defendió a su colega a capa y espada. Descalificó al congresista John D. Dingell y la comisión que presidía con palabras duras: "una amenaza contra la comunidad científica y la libertad de la ciencia".

Pero los hechos eran tozudos. Tuvo que retractarse. Ante la publicidad de las pruebas contra Imanishi-Kari, retiró formalmente su nombre del artículo, dejando a ésta con su propia responsabilidad. En una carta publicada en *Nature*, admitía la competencia del gobierno en la supervisión de la calidad de la investigación que financia y se disculpó ante Margot O'Toole, la juez del caso.

El debate se avivó con cartas cruzadas sobre el comportamiento ético y el abuso de los artículos de firma plural, con referencias a la necesidad de publicar para engrosar *curricula* y recibir ayuda financiera, amén de las insinuaciones sobre mandarinazgos y falta de escrúpulos de algunos jueces de revistas que sacan provecho indebido de su asesoría. Baltimore se hallaba en el ojo del huracán. Se le recriminó haberse alejado de lo que es norma en el proceso investigador y en la publicación de los resultados. Y los ánimos se encresparon todavía más cuando sostuvo que los datos aportados por el artículo de marras eran más coherentes que los manejados en la mayoría de los artículos. El senado académico de la Rockefeller contemplaba abatido la huida hacia delante de su director.

La controversia ha dividido a los biólogos, pero no ha mermado el prestigio científico de Baltimore. "Tiene una habilidad innata para plantear el problema correcto", reconoce Owen O. Witte, de la Universidad de California en Los Angeles, que trabajó con él a finales de los setenta. Y añade Naomi Rosenberg, hoy en la Universidad Tufts: "Tengo un sentimiento cierto de que he recibido una



DAVID BALTIMORE. Su presidencia en la Universidad Rockefeller estuvo sacudida por una tormentosa controversia sobre la ética científica. Fotografía: Quesada/Burke.

excelente formación en el laboratorio de Baltimore."

La fascinación de Baltimore por la biología experimental se le despertó en 1955, cuando todavía cursaba enseñanza media. Su madre, psicóloga experimental, alentó su interés por la fisiología, y en sus años jóvenes dedicó un verano a un cursillo de biología en el Laboratorio Jackson en Bar Harbor. Desde entonces, recuerda, "no volví ya la vista atrás". En el Swarthmore College, sus profesores fomentaron su inquietud por la biología molecular. Le aceptaron en un programa de investigación predoctoral, que sufragaba la Fundación Nacional de la Ciencia, en los laboratorios de Cold Spring Harbor (Long Island).

A finales de los cincuenta, esa estación constituía la meca de la investigación sobre los bacteriófagos, virus que infectan las bacterias. Preparó su doctorado en el MIT trabajando, era de presumir, con bacteriófagos, pero se le ocurrió "una idea divertida". Si los bacteriófagos estaban haciendo tanto por la comprensión de la biología molecular bacteriana, quizá los virus de los animales hicieran lo mismo por las células de estos organismos. Volvió a Cold Spring Harbor para seguir un curso sobre virus de animales; coincidió con Richard M. Franklin, virólogo de Rockefeller que estaba estudiando el modo en que los virus obligan a las células a fabricar ARN vírico, en vez del propio. "Allí se fraguó todo", recuerda.

Con el título de doctor en el bolsillo se trasladó al Instituto Salk de Estudios Biológicos, en La Jolla (California), para investigar sobre los poliovirus. Michael Jacobson, alumno a su cargo, realizó un descubrimiento sorprendente: cuando un poliovirus infecta una célula, fabrica primero una macromolécula de proteína, que se despedaza luego en unidades más pequeñas, hallazgo que sería determinante en el enfoque genético de Baltimore.

Regresó al MIT en 1968 con su futura esposa, Alice S. Huang. Empezaron por dilucidar si podían aplicarse los mismos principios para el virus de la estomatitis vesicular; la respuesta sería no. Se trataba de un virus de ARN de cadena negativa, que porta el mensaje genético complementario al necesario para producir más virus. "Eso me sugirió que los virus introducían en la célula polimerasas que copiaban el ARN de un molde negativo", expone; tras corroborar la hipótesis, comenzó a preguntarse qué otros virus podrían tener polimerasas.

En busca de la respuesta trabajó con virus de ARN responsables de tumores en animales. Dio con indicios de que tales virus poseían una enzima capacitada para transcribir ARN en ADN, en flagrante contradicción con el "dogma central" de la biología. Esa enzima era la transcriptasa inversa. La proeza le valió a Baltimore el premio Nobel de 1975, compartido con Howard M. Temin, de la Universidad de Wisconsin, quien llegó por su cuenta al mismo hallazgo. Hoy sabemos que la transcriptasa inversa es la característica distintiva de los retrovirus, grupo en el que se inscribe el HIV, el virus del SIDA. Tras el Nobel, Baltimore ramificó su interés hacia otras áreas, sin abandonar su tirón hacia los poliovirus, ni dejar de preguntarse por los mecanismos de la transcripción inversa.

De su extraordinario talento organizativo da fe Edwin C. Whitehead, industrial que le ofreció el cargo de director fundador de la institución de investigación biomédica que lleva su nombre. No se encerró en las tareas administrativas, sino que se mantuvo al frente de varios equipos de investigación durante uno de los períodos más productivos y excitantes de su carrera.

Un avance crucial fue la identificación de la proteína NF-κB que se enlaza con el ADN para iniciar la transcripción de éste en ARN mensajero. Por ceñirnos al último par de años, Baltimore y David G. Schatz, de la Universidad de Yale, aislaron dos genes, conocidos como *RAG-1* y *RAG-2*, que parecen ser los responsables de la redistribución de los segmentos de los genes correspondientes a los anticuerpos.

Los deberes presidenciales de la Rockefeller absorbieron su tiempo al comienzo, recortando sus horas de investigación. Emprendió acciones decisivas contratando nuevo personal administrativo, reformando las finanzas de la universidad y dando un peso mucho mayor a los profesores sin contrato fijo en los asuntos universitarios. En octubre vio consolidada su situación cuando David Rockefeller donó 20 millones de dólares a la universidad, en prueba de la "absoluta confianza" en él depositada. El allegamiento de fondos y la renovación del profesorado constituían sus dos retos principales. La mitad del claustro sobrepasa los 60 años.

Pero la mecha no se ha apagado. Su suerte y su comportamiento se ha comparado al de una tragedia griega: nunca se ha arrepentido con claridad, ni admitido su equivocación, y nadie le iba a vaciar los ojos por ello. Lo trágico, es que no necesitaba hacer eso. Otros, leyendo en las entrañas de las aves, adivinan su futuro: seguirá investigando.

Ciencia y sociedad

Debate paleontológico

Protoavis

Se habla de nuevos restos fósiles que podrían destronar a *Archaeopteryx* del pedestal de prioridad en que se asienta. Pero digamos en seguida que se reconoce al ave por la pluma. Sin ese carácter distintivo, *Archaeopteryx* sería un saurio depredador más, como ha ocurrido con tantos otros restos paleontológicos.

Hasta 1986 se creyó que los cinco conjuntos fósiles de *Archaeopteryx* recuperados en los yacimientos jurásicos de Solnhofen, en Baviera, constituían los restos aviares más antiguos de la historia evolutiva. Cifrábase su edad en unos 150 millones de años. No hace mucho, la Sociedad Geográfica Nacional estadounidense daba cuenta de la existencia de huesos fosilizados de ave hallados en un yacimiento texano perteneciente al Triásico superior, hace unos 225 millones de años; se convertía, así, en el ave más antigua del planeta. Dirigía el trabajo de campo Sankar Chatterjee, profesor de geología en la Universidad Técnica de Texas. El descubrimiento real de los mismos ocurrió en 1983, en los sedimentos triásicos de origen continental de Post, en el oeste del estado. Tras el estudio de los restos llegó a la conclusión de que pertenecían a dos individuos de una misma especie, la que luego llamaría *Protoavis*. Los expertos respondieron con un mohín de escepticismo. Pero en 1991 aparecieron en las *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (serie B, volumen 332, páginas 277-342) las primeras descripciones y valoraciones, si bien limitadas a los restos craneanos, dejándose para más tarde lo correspondiente al resto de los huesos.

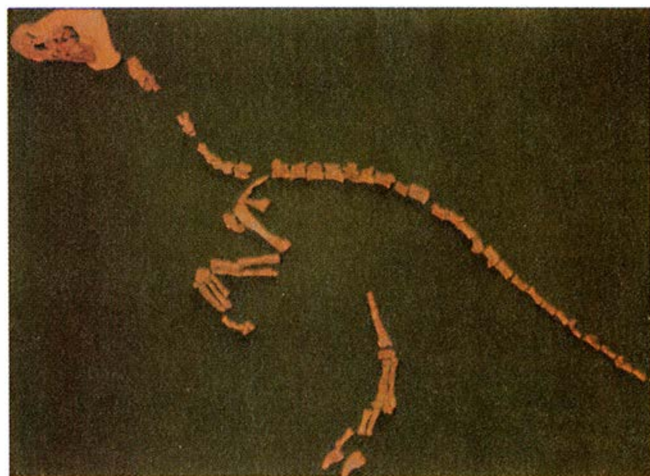
Los cráneos no estaban enteros. Por tanto, la reconstrucción constituye ya una recreación basada en hipótesis. Chatterjee expone la morfología de la región cefálica, ocular y auditiva. Compara 30 rasgos con los correspondientes de Tecodontos, Terópodos y la propia *Archaeopteryx*, así como con aves jóvenes del Cretácico. Resuelve que 20 de ellos son caracteres peculiares de las aves y los 10 restantes deben presumirse más primitivos.

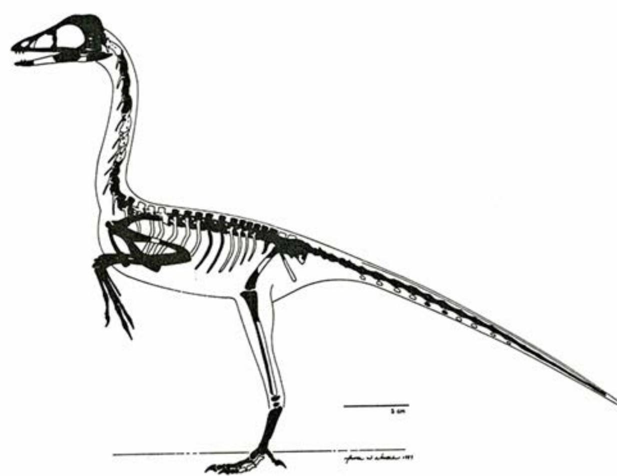
Ahora bien, una exhaustiva comprobación nos demuestra que 12 de esos 20 caracteres se encuentran ya en otros saurios, los Pterosaurios; por ejemplo, el *lobus olfactorius* del encéfalo. Nunca es mucha la cautela, admitida por el propio autor, cuando tratamos de las aves en la era Secundaria. Otros rasgos que presentan el *Avimimus* terópodo y los saurios voladores son la estructura ligera del cráneo, los grandes orificios orbitales (que capacitan para la visión) y la movilidad de ciertos elementos craneales. Los terópodos del Jurásico inferior (*Syntarsus*) y del Cretácico (*Troodon*) se adornan de peculiaridades de las aves, sin que tengamos que incluirlos entre ellas. Se trata, sin más, de una proximidad de parentesco.

Ello no obstante, Chatterjee concluye que *Protoavis* es el representante más antiguo de la clase de las aves, altamente especializado y mucho más afín a ellas que a cualquier otro grupo de los arqueosaurios. Y crea el nuevo orden de las Protoaviformes para la especie arquetípica *Protoavis texensis*. Los Protoaviformes constituirían una línea más directa hacia la configuración de las aves modernas que los *Archaeopteryx,* 75 millones de años más jóvenes y ramificación hermana del *phylum* aviar.

Otro argumento en favor de la naturaleza aviar de *Protoavis* sería, en opinión de Chatterjee, la relación característica entre tamaño del cuerpo y volumen de la caja craneana. Tras cálculos y extrapolaciones, cifra en 3,32 centímetros cúbicos el volumen y en 600 gramos su peso corporal. De acuerdo con ello, *Protoavis* tendría un cociente de encefalización de 0,41, valor observable en las aves actuales. Aunque no existen datos que respalden semejante relación, Chatterjee no se detiene ni siquiera para asegurar que se trataba de un animal de sangre caliente.

Las estimaciones de los valores anteriores, basadas en restos fragmenta-





FRAGMENTOS DEL ESQUELETO del individuo menor de Protoavis (izquierda) *y reconstrucción hipotética del ejemplar mayor. Su descubridor, el paleontólogo Sankar Chatterjee, de la Universidad Técnica de Texas, considera los restos pertenecientes a un ave que precedió a* Archaeopteryx *en 75 millones de años.*

rios de cráneo y huesos, se nos antojan bastante aventuradas. Exceptuando cúbito y radio, no se ha encontrado entero ningún hueso largo. Se parte de longitudes aproximativas para inferir el peso corporal. Los paleontólogos son reacios a trabajar de forma tan insegura, mucho más si se trata de extraer conclusiones tajantes. No debemos olvidar que los terópodos *Troodon* y *Dromiceiomimus* poseían un encéfalo relativamente grande.

La pregunta es obligada: ¿Ha de ser un ave, esto es, un vertebrado de sangre caliente, dotado de plumas y capaz de volar, sólo por tener características propias de esa clase? ¿Acaso no son de esperar esos rasgos en arqueosaurios, que si bien pueden pertenecer a un grupo amplio de predecesores de las aves, no son todavía éstas? Además, *Protoavis* no manifiesta señal alguna de plumaje.

Las dudas suben de tono en cuanto atendemos al resto de esqueleto que Chatterjee coloca junto al cráneo. El lugar donde se hallaron nos mueve a redoblar la cautela. Se trata de estratos formados por un plano de inundación en un clima húmedo y caliente, acumulación originada por meandros fluviales. Los restos de la fauna vertebrada descansan en una capa de roca, con material óseo acarreado por el agua. Los fósiles de *Protoavis* están desparramados al azar, sin su debido orden natural, en uno de los bloques de roca extraídos. Va a resultar muy difícil demostrar que, como sostiene Chatterjee, pertenezcan a sólo dos individuos de una misma especie, aunque de tamaño distinto.

Y en la hipótesis de que se pudiera demostrar habría que aportar restos óseos no craneales mejor conservados que los fragmentos recuperados, sobre todo de los que son más específicos: los de la horquilla y el esternón. Con lo que hoy podemos fácilmente inclinarnos por adscribirlos a individuos terópodos. Lo mismo es aplicable a los huesos de las extremidades, en particular para el metatarso; la conclusión de que se trataba de un bípedo erecto corredor, aunque fuera correcta, debe predicarse también de los terópodos. Los huesos metacarpianos, bien desarrollados, con dedos cortos, niegan una estructura voladora. Las extremidades anteriores son más primitivas que las de *Archaeopteyx* y no insinúan ninguna adaptación al vuelo.

Se han puesto en cuestión las presuntas marcas de plumas, llegándose a dudar por parte de los paleontólogos que el propio cráneo y los huesos pertenezcan a un mismo animal. Los yacimientos texanos son pródigos en restos fosilizados de distintos vertebrados (anfibios, reptiles y terópodos). Se trata, además, de un tiempo, el período Triásico, especialmente interesante para la aparición de nuevas formas de vida. Con los datos en la mano, yo no diría más que nos hallamos ante restos de un terópodo aviforme. (Peter Wellnhofer, conservador y director accidental de la Comisión de Paleontología y Geología Histórica del estado de Baviera en Munich.)

Plaga verde en el Mediterráneo

Caulerpa taxifolia

La reciente expansión por el Mediterráneo occidental de *Caulerpa taxifolia*, un alga tropical, ha puesto en jaque a las administraciones públicas y a los biólogos marinos: en el otoño de 1991 se implantaba en la localidad de Saint Cyprien, a 30 kilómetros escasos de la frontera hispano-francesa.

Aunque ocasionalmente las algas causen problemas, su existencia es indispensable para el correcto funcionamiento del ecosistema marino. Un gran número de ellas son microscópicas y viven en suspensión en el agua, formando parte del plancton. Otras, generalmente de mayor tamaño, se asientan sobre el fondo marino, sobre substrato rocoso y a poca profundidad, y constituyen parte del bentos. Ambos tipos de algas, planctónicas y bentónicas, son los productores primarios del mar y proporcionan materia orgánica que posteriormente se transmitirá al resto de la red trófica. Desempeñan, pues, la función de base trófica del ecosistema marino.

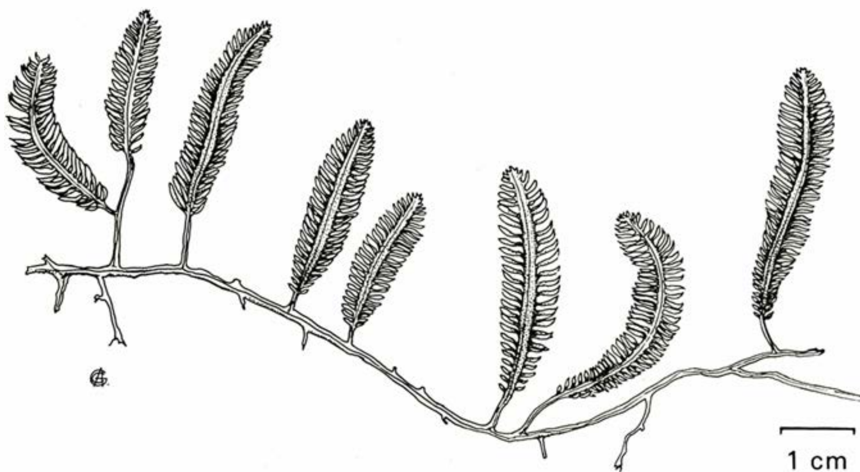
Las algas bentónicas, *Caulerpa taxifolia* pertenece a ellas, no ocupan la totalidad del fondo marino, sino que su dispersión está limitada por la disponibilidad de luz. La profundidad máxima a la que las algas pueden vivir está así condicionada por la transparencia del agua, que varía según los distintos mares del globo. En el Mediterráneo, esa profundidad no sobrepasa los 120 metros y en las costas catalanas no suele superar los 80 metros. Las algas bentónicas cubren, pues, un área restringida de la superficie total del mar; de hecho, se circunscriben a las partes más someras de la plataforma continental. Lo que no impide que la materia orgánica aportada por las algas bentónicas en las zonas costeras resulte decisiva para la economía del mar, superior a la contribución del fitoplancton.

Las algas marinas tienen numerosas aplicaciones. Los alginatos, obtenidos a partir de macroalgas pardas, se aprovechan en múltiples usos: fabricación de material incombustible, estabilizadores en el sector alimentario, preparados farmacológicos, pinturas y barnices, cosméticos y fotografía. Los carrageanos y el agar, extraídos de algas rojas, se emplean en la industria alimentaria (estabilizantes, espesantes), en la elaboración de cosméticos, en farmacología, medicina y microbiología.

Mas, a pesar de su interés en la cadena trófica del ecosistema marino y de su aprovechamiento industrial por el hombre, las algas constituyen a veces fuente de problemas. Pensemos por ejemplo en las explosiones demográficas ("blooms") de dinoflageladas o cianofíceas, de consecuencias negativas para los organismos filtradores de consumo humano. O vengamos al más reciente de la expansión mediterránea de *Caulerpa taxifolia*, especie común en los mares tropicales de todo el mundo, y cuya rápida adaptación a las condiciones ambientales del Mare Nostrum empieza a inquietar.

Según los investigadores franceses Boudouresque y Meinesz, *Caulerpa taxifolia* se habría implantado en las costas de Mónaco hacia el año 1984, a partir de ejemplares provenientes del acuario del Museo Oceanográfico monegasco. Desde entonces ha invadido unas 30 hectáreas de fondo marino, de 3 a 35 metros de profundidad, en la zona comprendida entre Mónaco y Niza. Se han detectado también nuevos focos de infección en otros puntos de las costas francesas, siendo Saint Cyprien la localidad más cercana a las costas españolas. Según la información facilitada por los investigadores franceses, parte de estos nuevos focos podrían provenir de algas escapadas de otros acuarios tropicales, públicos o privados. *Caulerpa taxifolia* es especie preferida de los acuariófilos franceses y podía comprarse, hasta el momento de escribir estas líneas, en diversos establecimientos.

El problema que acarrea la implantación del alga reside en su elevada capacidad invasora. Se desarrolla sobre todo tipo de substrato, siempre que el hidrodinamismo no sea violento, entre 0 y 35 metros de profundidad. Su rápido crecimiento, su tamaño notable en comparación con las algas propias del Mediterráneo, y su capacidad de acumular biomasa



CAULERPA TAXIFOLIA *es alga bentónica y originaria de los mares tropicales. Su asentamiento en la costa occidental mediterránea puede acarrear graves problemas al ecosistema marino, si bien apenas se conoce su biología.*

facilitan una rápida expansión a expensas de la eliminación, en la competencia por la luz y el espacio, de la flora autóctona. Este empobrecimiento florístico repercute, a su vez, en la fauna bentónica. En efecto, muy pocos organismos mediterráneos son capaces de alimentarse de *Caulerpa taxifolia.*

Desconocemos el secreto de tan fácil adaptación del alga a las condiciones ambientales del Mediterráneo. La temperatura del agua mediterránea en invierno es del orden de 6 o 7 grados centígrados, inferior a las temperaturas mínimas en los mares donde medra *Caulerpa taxifolia.* El tamaño que aquí alcanza, además, resulta insólito en sus mares tropicales.

Se han puesto en marcha estudios ecofisiológicos y genéticos para determinar si el comportamiento frente a los factores ambientales o la constitución genética de la población implantada en el Mediterráneo difieren de la respuesta y la constitución genética de las poblaciones en su lugar de origen. Para controlar su expansión por el Mediterráneo, las autoridades francesas han iniciado un proyecto de investigación, en el que participan distintos centros, que abordará, entre otras, las cuestiones siguientes: localización exacta de las poblaciones mediterráneas de *C. taxifolia*, competencia entre esa alga y el resto de la fauna y la flora mediterráneas, naturaleza y concentración de las toxinas, diferencias genéticas entre las poblaciones mediterráneas y las de las regiones tropicales, tasas de crecimiento e intensidad de reproducción de la especie, valores del medio mediterráneo letales para la misma y técnica de erradicación más eficaz.

Por el lado español, la administración autonómica y el Centro de Estudios Avanzados de Blanes han acometido una labor de vigilancia en las costas para evitar la proliferación de *C. taxifolia.* Los investigadores españoles trabajan en estrecho contacto con los laboratorios franceses para intercambio de información sobre la distribución, la biología de la especie y las posibilidades de erradicación. Estas últimas dependen bastante de la detección precoz. (Enric Ballesteros, del Centro de Estudios Avanzados de Blanes.)

Genética antisentido

Transcripción y replicación de virus con ARN de cadena negativa

Entre los virus de ARN de cadena negativa se distinguen seis familias. Arenavirus, Bunyavirus y Ortomixovirus poseen un genoma segmentado; el genoma de las otras tres, Rabdovirus, Filovirus y Paramixovirus, es un segmento indiviso de ARN. Hay, en esas familias, virus responsables de infecciones importantes para la salud humana y animal, como los de la gripe, la rabia, el sarampión, el virus respiratorio sincitial y el virus de la estomatitis vesicular.

La investigación de muchos aspectos de la biología de estos virus, incluidas la transcripción y replicación de su genoma, ha progresado con lentitud mayor que los estudios consagrados a los virus que contienen ARN de polaridad positiva. Ello ha sido debido a que, hasta fechas recientes, resultaba imposible incorporar en virus infectivos los cambios introducidos por ingeniería genética en los ADN complementarios de sus ARN correspondientes, y abordar así los fenotipos de estos mutantes en un entorno biológico adecuado.

¿Cuál es la característica distintiva de estos virus con ARN de cadena negativa? Su información genética: se encuentra en versión complementaria a la de los ARN mensajeros (ARNm), en forma de ribonucleoproteínas constituidas por asociación de sus ARN genómicos con subunidades de nucleoproteína (proteína N o NP). En razón de ello, una vez ha penetrado el virus en una célula, no cabe ya la traducción directa de las proteínas a partir de los ARN de las partículas víricas. De ahí que haya siempre en éstas una ARN polimerasa dependiente de ARN, encargada de la síntesis de ARNm vírico a partir de ARN genómicos (transcripción primaria), enzima sin la cual no puede iniciarse la infección.

Esas peculiaridades del ciclo infectivo han obligado a superar dos problemas técnicos para acometer trabajos de genética inversa en tales virus. Por un lado, hubo que reconstruir ribonucleoproteínas a partir de ARN víricos transcritos *in vitro*, de modo que fueran molde adecuado para la transcriptasa vírica. Por otro, ha sido preciso suministrar en *trans* los elementos (ARN polimerasa, nucleoproteína, etcétera) para los procesos de transcripción y replicación, en los casos en que no estuvieran codificados en la ribonucleoproteína reconstituida.

Para los virus de la gripe (Ortomixovirus), el problema revestía mayor complejidad técnica. A diferencia de los otros virus con ARN de cadena negativa, éstos llevan a cabo la transcripción y replicación de su ARN en el núcleo de la célula infectada.

Con el propósito de obviar esos problemas, el equipo de P. Palese, de la Escuela de Medicina del Monte Sinaí en Nueva York, construyó moléculas de ARN sintéticas en las que se enmarcaba la región codificante del gen *cat*, responsable de la cloranfenicol-acetil-transferasa (CAT) de *E. coli*, entre las secuencias terminales del ARN del virus de la gripe. El ARN en cuestión se asemeja a uno de los segmentos del ARN vírico, mas, debido a su polaridad negativa, es incapaz de expresar la enzima CAT, salvo que la transcriptasa vírica lo transcriba intracelularmente.

Para empaquetar el ARN y transferirlo a las células en cultivo, se usó un extracto de proteínas derivadas de viriones purificados que contenía al menos la NP y las tres sub-

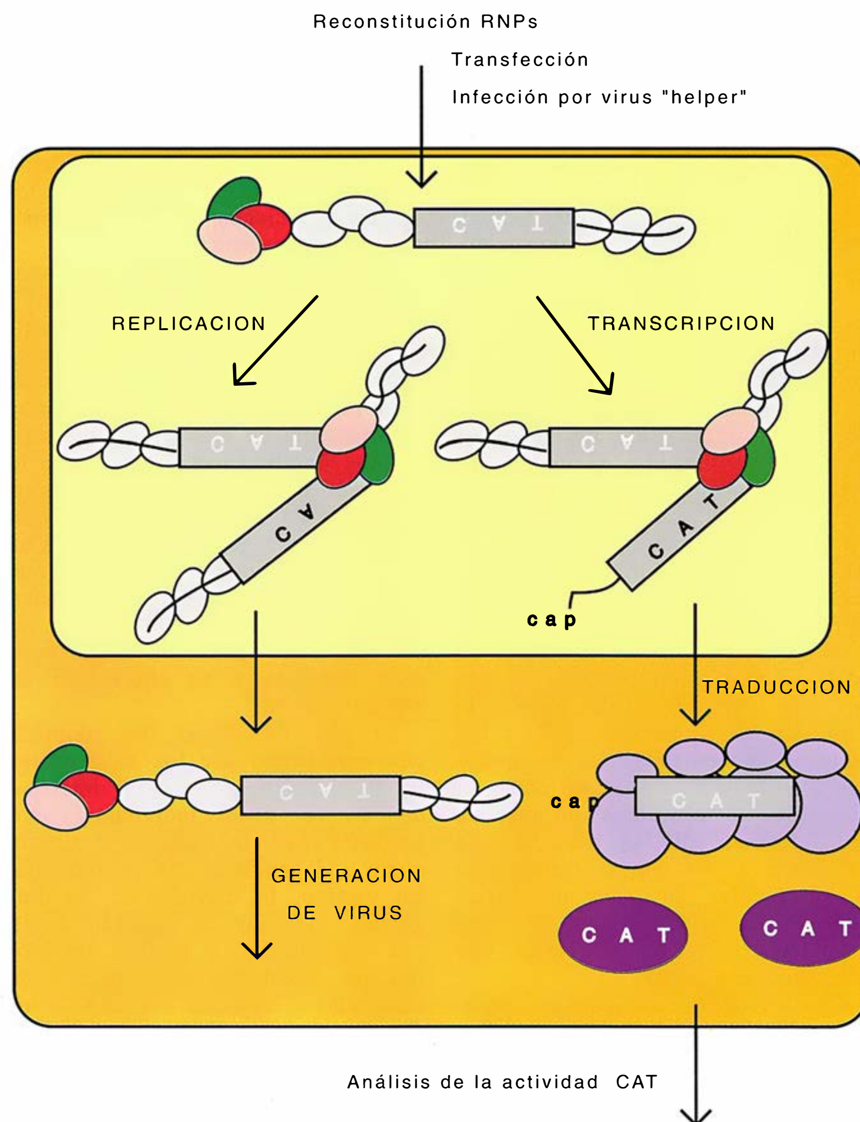
unidades de la ARN polimerasa (PB1, PB2 y PA). A pesar de contar con esas proteínas, suficientes en principio para la expresión de CAT, sólo se detectaba la presencia de la enzima si aquellas proteínas se expresaban en *trans* en la misma célula. Se recurrió, para ello, a la coinfección con un virus colaborador ("helper"); más recientemente se ha provocado la expresión de estas proteínas mediante recombinantes derivados del virus de la vacuna (grupo de M. Krystal, en el neoyorquino Monte Sinaí) o recombinantes del virus SV40 (nuestro propio grupo).

Esos ensayos nos han demostrado que, para los procesos de transcripción y replicación del ARN del virus de la gripe en células en cultivo, se requieren sólo las tres subunidades de la polimerasa y la nucleoproteína, aunque no está descartada su modulación por otras proteínas víricas. Los resultados sugieren, además, que se requiere la estructura de ribonucleoproteína para la correcta localización del ARN vírico en el interior celular, pues la transferencia de ARN desnudo a células que expresan en *trans* las proteínas de la maquinaria de transcripción y replicación no produce actividad CAT detectable; sugieren, asimismo, que ha de suministrarse en proporciones estequiométricas alguna de las proteínas necesarias para estos procesos, ya que la viabilidad del experimento exige su aporte adicional.

Ese planteamiento permite un análisis pormenorizado de la secuencia del promotor vírico, de los genes implicados en la transcripción y la replicación del ARN y de las regiones o dominios de la proteína directamente involucradas en estas funciones. Los segmentos de ARN sintéticos que se transfieren a la célula pueden recuperarse luego en el virus infectivo progenie si se dispone de un sistema de selección adecuado; queda así abierto el camino para la construcción de cepas de virus recombinantes diseñadas a voluntad, bien sea para subsiguiente experimentación o bien para la generación de cepas de vacuna atenuadas de forma controlada.

Dentro de los virus indivisos, o no segmentados, los avances más espectaculares se han producido en el Rabdovirus VSV, del que disponíamos ya de un sistema de transcripción y replicación *in vitro* bastante eficaz. G. Wertz y sus colegas, de la Universidad de Alabama en Birmingham, han puesto a punto un sistema de co-expresión de las proteínas de este virus en células en cultivo; lo fundan en la transferencia ("transfección") de mezclas de plásmidos en los que los genes víricos correspondientes están controlados por el promotor de la ARN polimerasa del fago T7. La infección del cultivo celular con un virus de la vacuna que expresa dicha ARN polimerasa promueve la expresión de esos genes, y hacerlo de suerte que sus niveles de acumulación dependan de las proporciones de los plásmidos pertinentes durante la transferencia.

Para introducir un molde adecuado en estas células, el grupo de Wertz recurrió a un virus VSV defectivo interferente (DI), portador de un mini-ARN incapaz de suministrar las funciones para su transcripción y replicación. Con este sistema se ha demostrado que estos procesos se desarrollan *in vivo* merced a la acción conjunta de las proteínas L (polimerasa), P (fosfoproteína) y N (nucleoproteína). Si además se suministran las proteínas G (glicoproteína) y M (matriz), se obtendrán partículas DI progenie. Se trata, pues, de un sistema eficaz de analizar los isómeros en *trans* necesarios para la transcripción y replicación del ARN de VSV; el método sirve también para estudiar el resto de las funciones implicadas en su ciclo infectivo. Pero no puede emplearse para el análisis de las señales en *cis* necesarias para la transcripción y replicación de un molde de ARN, ya que el ARN usado no se ha generado de forma artificial.



RESCATE DEL GEN CAT en virus de la gripe. Para expresar la actividad CAT y rescatar el gen cat en virus de la gripe infectivo se reconstituyó un ARN transcrito in vitro *que contenía dicho gen en polaridad negativa (-TAC-) enmarcado por las secuencias terminales del ARN vírico, con proteínas purificadas de partículas víricas. La trasferencia de las ribonucleoproteínas formadas sobre células que están infectadas por el virus de la gripe da lugar a su transcripción por la ARN polimerasa vírica y a la expresión de la enzima CAT. Asimismo, la ARN polimerasa vírica es capaz de replicar dicha ribonucleoproteína.*

Con un enfoque experimental similar, D. Kolakofsky y sus colaboradores, de la Universidad de Ginebra, analizaron las funciones necesarias para la transcripción y replicación del virus de Sendai, miembro de la familia de los Paramixovirus. Se requiere aquí también la intervención de las proteínas L, N y P. Se demostró, además, que la proteína V actúa de modulador negativo de la replicación; la proteína V ha permanecido a lo largo de la evolución sin cambios reseñables ("es muy conservadora"), abunda en el aminoácido cisteína y se expresa como producto alternativo de la proteína P.

El grupo de Krystal abordó el virus Sendai con un planteamiento experimental similar al descrito antes para los Ortomixovirus. Se emplearon las secuencias terminales de ARN de este virus para construir un ARN artificial, portador del gen *cat* en polaridad negativa. Para sorpresa de todos, se logró la expresión de la enzima CAT en células que habían recibido ese ARN, fuera colaborador ("helper") el virus Sendai, otros Paramixovirus o lo fuera incluso el virus de la gripe.

Nos indican tales resultados que las señales presentes en el ARN del virus Sendai se encuentran en un estado de tal degradación que permiten la interacción con proteínas implicadas en la replicación de ARN de virus evolutivamente distantes. Se comprobó, además, que, a diferencia de lo reseñado a propósito del virus de la gripe, la interacción entre el ARN que se ha de transferir ("transfectar") y proteínas específicas del virus no es absolutamente necesaria para su actividad en la célula. El ARN artificial que contiene el gen *cat* está capacitado para inducir la expresión de la enzima CAT, y hacerlo ya sea en presencia de proteínas de células no infectadas como en ausencia de proteínas durante la transferencia; sólo se necesita una condición, la de que se suministren las moléculas en *trans* necesarias mediante la infección con un virus colaborador ("helper"), aunque con una eficiencia menor.

Con un diseño experimental parecido, el grupo de P. Collins, del Instituto Nacional de la Salud en Bethesda, ha investigado las secuencias terminales necesarias para la replicación y transcripción del virus respiratorio sincitial humano, agente causal de la mayoría de las infecciones respiratorias de los niños menores de 2 años.

Así pues, los conocimientos acumulados en la última década sobre los mecanismos de transcripción y replicación del ARN de los virus con cadena negativa han permitido la superación de las dificultades técnicas que impedían hasta ahora abordar los mecanismos de genética inversa en los mismos. La profundización en esa vía habrá de conducirnos a un mayor dominio de la estructura vírica, de las interacciones virus-célula y de la patogénesis de las infecciones, entre otros. (Juan Ortín y Susana de la Luna, del Centro Nacional de Biotecnología y Centro de Biología Molecular, Madrid.)

Lengua y visión del mundo

Los colores de la nieve

La relatividad lingüística —la idea según la cual la lengua que se habla configura la visión del mundo— se propuso en los años cuarenta de nuestro siglo, gozó de extendido predicamento en la década siguiente y perdió su crédito, cuestionada por sólidas objeciones, en las postrimerías de los sesenta.

La relatividad lingüística se conoce también por "hipótesis de Whorf", en honor de Benjamin Lee Whorf, agente de seguros y lingüista aficionado que la popularizó. "Despiezamos la naturaleza, la organizamos repartiéndola en conceptos y le atribuimos significaciones tal y como lo hacemos, porque, sobre todo, somos partícipes de un convenio para organizarla de este modo", escribió. "Una misma evidencia física no hará que todos cuantos la observen se formen idéntica imagen del universo, a no ser que sus trasfondos lingüísticos sean similares o se equivalgan de alguna manera."

La idea de Whorf fue adoptada con entusiasmo por los cultivadores de la antropología cultural interesados en ver a los individuos como productos de la cultura y a ésta como independiente de la biología. En cambio, la mayoría de los lingüistas consideró la hipótesis como una especulación y prefirió las teorías que daban más importancia a los materiales y aspectos comunes a todas las lenguas. Los universalistas parecieron ganar la batalla en 1969, cuando Brent Berlin y Paul Kay, de la Universidad de California en Berkeley, refutaron la tesis de que la percepción de los colores varía según las culturas. Encontraban estos estudiosos que todas las lenguas juntaron los términos para designar colores ateniéndose a un patrón estricto. Tras alguna precisión, lo que ahora dicen es que las lenguas que tienen dos términos agrupan bajo uno de ellos el rojo, el amarillo y el blanco, y bajo el otro el verde, el azul y el negro. Las que tienen tres juntan en un grupo el rojo y el amarillo, como opuestos al blanco. Las lenguas van añadiendo otros términos mediante sucesivas divisiones de las restantes categorías.

A estas refutaciones se añadió el ridículo cuando quedó desprestigiada la anécdota whorfiana que más se había ido repitiendo. Sostenía Whorf que los esquimales emplean muchas palabras distintas en vez de la única con que cuentan los ingleses para designar la nieve: 'snow'. Y concluía que un esquimal y un inglés perciben diferentemente una misma masa de nieve, puesto que encajan el concepto en diferentes cuadrículas léxicas. Pero he aquí que Laura E. Martin, antropóloga de la Universidad estatal de Cleveland, examinando críticamente los argumentos de Whorf, halló que éste había exagerado el número de los vocablos esquimales para designar la nieve y, a la vez, había infraestimado el número de los que hay en inglés para lo mismo: *slush* [=aguanieve], *powder* [neviza], *blizzard* [nevisca] y otros varios.

Hubo, sin duda, errores —admite John J. Gumperz, especialista en antropología lingüística de Berkeley. Pero, a su parecer, Whorf acertó en parte, y los investigadores están revisando actualmente las ideas relativistas a la luz de reconocidos universales del lenguaje. Gumperz, que contribuyó a organizar una conferencia sobre el tema celebrada el pasado verano, dice que los lingüistas están particularmente interesados por la 'indexicalidad' —convenciones culturales acerca de cómo varían los significados de las palabras al cambiar las circunstancias de su uso. Por ejemplo, el pronombre nos significa una cosa en la frase "Nos ha tocado la lotería" y otra cosa cuando se emplea en plural mayestático.

Otra área de investigación es la de los usos del lenguaje que no tienen por centro al individuo —deliberaciones de información que nadie posee él solo en un momento dado. Un pensar así, digamos que extracorpóreo o desindividualizado, es hallable en los rítmicos recursos mnemónicos de las culturas orales y también en la escritura, que le capacita a uno para elaborar y controlar su propio discurso. Los hábitos que se forman con el leer y el escribir suelen dejar a menudo su impronta en las maneras de expresarse... por ejemplo, haciendo que una persona hable como un libro.

Las distinciones espaciales de la propia lengua las dominan sus hablantes desde muy temprana edad, dice Melissa Bowerman, también perteneciente al grupo Max Planck recién citado. Esta investigadora aduce estadísticas de niños coreanos que ya desde los 18 meses de edad entienden los exóticos distingos que se hacen en su lengua. Por ejemplo, distinguen entre "poner apretando" y "poner sin apretar", como en la frase: "El pone (apretando) el corcho en la botella, que está (puesta sin apretar) sobre la mesa". La psicología del desarrollo da por averiguado, desde los clásicos experimentos del psicólogo suizo Jean Piaget, que los niños desarrollan primero conceptos del espacio y después aplican a esos conceptos el lenguaje. Pero si, como cree Bowerman, el orden a veces se invierte, entonces puede que el desarrollo intelectual mismo esté condicionado por la cultura. "Comparto la opinión —dice Kay— de que los resultados obtenidos por Bowerman son muy impresionantes".

Pero Kay aconseja también que no se exageren los contrastes entre las lenguas. Pues, como dice, las lenguas que hacen distinciones únicas suelen hacer también las más comunes y familiares. Así, por ejemplo, a las lenguas de Occidente se las ha caracterizado por su representar el tiempo en términos lineales, en contraste con los términos cíclicos de muchas lenguas no occidentales. "Pero las lenguas de Occidente tienen los días de la semana, los meses del año y las estaciones, que son esquemas cíclicos", asegura, y en las lenguas no occidentales tampoco deja de haber esquemas de linealidad. Los whorfianos han tendido algunas veces a no fijarse en la diversidad que existe dentro de cada lengua.

Macroestructuras del universo

Fin de una tendencia

A lo largo de los últimos diez años, los astrónomos habían ido descubriendo racimos de galaxias, cada vez más nutridos —desde cúmulos y supercúmulos hasta la inmensa macroestructura solitaria de la Gran Muralla—, rodeados por vacíos abismales. No se le veía punto final a esa tendencia. Cuanto mayor era la porción de firmamento escudriñada, mayores estructuras aparecían. Recordaba la situación de los topógrafos del siglo pasado, y comienzos de éste, que a medida que exploraban más terreno de Australia y Africa, descubrían montañas más altas y valles más profundos.

Pero un rastreo reciente de la distribución de las galaxias en el es-

pacio lejano, llevado a cabo por Augustus Oemler, de la Universidad de Yale, Stephen A. Schectman, de la Institución Carnegie, Robert Kirsh-ner, de la Universidad de Harvard, y Paul Schecter, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, con el telescopio de 2,5 metros del observatorio chileno de Las Campanas, sugiere el fin de esa tendencia hacia el agrupamiento creciente de la estructuras del universo.

Ese trabajo se acerca, en varios aspectos, al realizado hace dos años por un grupo del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard que descubrió la Gran Muralla, una cortina de galaxias de varios cientos de millones de años luz de longitud. Ambos grupos determinaron las distancias de las galaxias midiendo el grado de corrimiento hacia el rojo que experimentaba su luz en su alejamiento de la Tierra. Los dos grupos también cartografiaron cortes, finos y profundos, en vez de los acostumbrados mapas de zonas extensas y laminares; ahora bien, mientras los de Harvard medían uno a uno el corrimiento de las galaxias, el grupo de Las Campanas calibró el de muchas a la vez.

Semejante hazaña sólo es posible con el telescopio de Las Campanas, que posee un campo de visión insólitamente ancho y está dotado con detectores de fibra óptica diseñados por Schectman. El telescopio se enfoca en una zona del espacio que abarca un centenar de galaxias; la imagen de cada galaxia entra por su propia fibra óptica, que revierte en un espectrómetro que mide el corrimiento hacia el rojo.

Los cortes del rastreo efectuado en Las Campanas se prolongan entre mil y dos mil millones de años luz allende la Tierra, la décima parte del radio del universo observable. Esta cifra corresponde a distancias tres o cuatro veces más lejanas de la región estudiada por el grupo de Harvard.

Hasta ahora, el grupo de Las Campanas ha registrado la posición de unas 6500 galaxias en varios cortes del firmamento. Aunque el estudio ha revelado la existencia de cúmulos de galaxias y de grandes vacíos comparables a la Gran Muralla, no se ha encontrado ninguna estructura mayor, cosa que sugiere que no existen hiperestructuras superiores.

Los interesados insisten en el carácter provisional de su trabajo. Afirman que las conclusiones cosmológicas serán más fiables cuando se hayan analizado 5000 galaxias más y después de realizar un exhaustivo estudio estadístico de los datos, que no se limite al barrido escueto. Con todo, la observación visual sigue siendo un buen método de percepción de los objetos y las estructuras cósmicas.

Provisionales o no, los datos a que hacemos referencia han traído el alivio a muchos cosmólogos. La tendencia al agrupamiento no sólo había creado una escasez de superlativos, sino también importantes problemas teóricos. El enredo mayor estaba en el fuerte contraste entre el agrupamiento de las galaxias y la excepcional uniformidad de la radiación de microondas cósmica, resplandor residual de la gran explosión. Y habrán de explicarnos los teóricos cómo un universo uniforme ha podido originar la Gran Muralla y demás macroestructuras.

Correr y resistir

La marca del berrendo

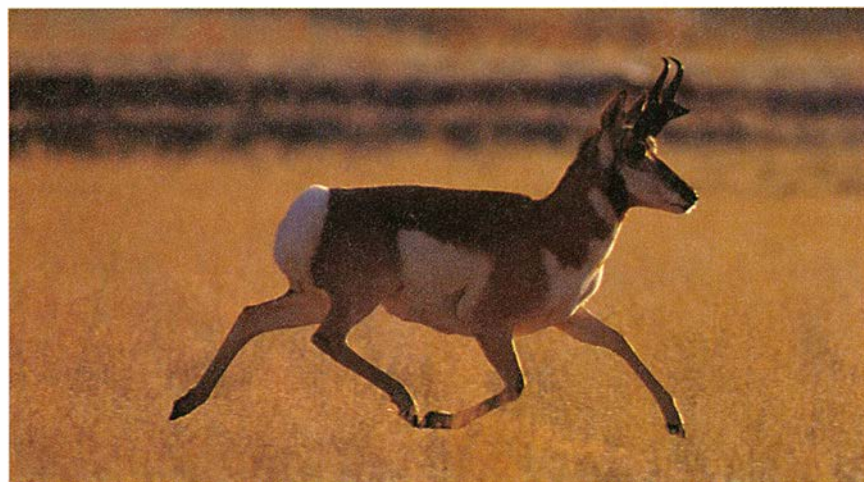
Los guepardos son más rápidos: en distancias cortas, pueden correr a 95 kilómetros por hora. Los caballos de carreras reciben más atención cuando se acerca el Derby. Mas, para la carrera a gran velocidad y a larga distancia, ningún animal bate al berrendo o antílope americano (*Antilocapra americana*). Se les ha cronometrado siguiéndolos en jeeps; las estimas más fiables sostienen que cubren con relativa normalidad 16 kilómetros en 15 minutos. Es seguro, afirman los expertos, que pueden mantener los 72 kilómetros por hora.

El grupo de Stan L. Lindstedt, fisiólogo de la Universidad de Arizona del Norte, y otros de la de Wyoming en Laramie y la de Berna, completaron recientemente un análisis de lo que hace que estos herbívoros "trucados" sean tan rápidos y resistentes. Como señala su informe en *Nature*, el secreto del antílope americano reside en pequeñas adaptaciones fisiológicas y estructurales que le permiten consumir oxígeno con una eficiencia más de tres veces superior a la esperada. "Sabíamos que íbamos a encontrar algo diferente en relación a sus músculos o bien en relación a la absorción de oxígeno", explica Lindstedt. "Nos hallamos con lo segundo. Los berrendos, lisa y llanamente, están capacitados para metabolizar mucho más oxígeno que otros animales de su talla."

Por regla general, los mamíferos pequeños consumen oxígeno de manera mucho más voraz que los mayores. Un gramo de músculo de musaraña consume en un día el oxígeno que un gramo de tejido de elefante gasta en un mes. La tasa de consumo de oxígeno es un factor crítico limitante en el rendimiento de un animal que corre: cuanto más aprisa trabaja un animal, más oxígeno consume.

A partir de un determinado punto, el animal ya no puede quemar el oxígeno más deprisa. Los incrementos subsiguientes en el rendimiento dependerán, entonces, del metabolismo anaerobio, que obtiene energía del glucógeno y produce ácido láctico como producto de desecho. En la mayoría de especies, el rendimiento anaeróbico máximo sólo puede mantenerse durante unos cuantos minutos.

Para encontrar el origen de la resistencia del antílope americano, Lindstedt y sus colegas colocaron máscaras respiratorias a dos berren-



LOS BERRENDOS son los campeones indiscutibles de la carrera de resistencia. Se acaban de descubrir las causas fisiológicas de su poder. Foto: Comstock.

dos jóvenes y los instalaron en una pista móvil inclinada. (El motivo de la inclinación era doble: no deseaban lastimar a los animales con una velocidad demasiado elevada, y la pista móvil no podía mantener el ritmo de los berrendos en una superficie llana.) Cuando la utilización del oxígeno por parte de los berrendos se estabilizó y empezó a acumularse ácido láctico en su sangre, los investigadores supieron que habían encontrado la tasa máxima de consumo de oxígeno de los animales. Dicha tasa era el triple de la cifra típica de animales del peso corporal del berrendo; la verdad es que se parecía a la de un ratón.

Después, el grupo de Lindstedt pasó revista a la fisiología del berrendo y encontró varias explicaciones para su capacidad aeróbica. Poseen unos pulmones espectaculares, cuyo tamaño triplica los de cabras de tamaño comparable. El corazón de un antílope americano es insólitamente grande y su sangre es rica en hemoglobina, lo que significa que puede suministrarse más oxígeno a los músculos en menos tiempo. Las células musculares del berrendo están, asimismo, repletas de mitocondrias, las estructuras que queman oxígeno como combustible. Tomadas en su conjunto, estas adaptaciones permiten al antílope americano correr largos trayectos. Velocidad y resistencia pueden serles imprescindibles para escapar de los lobos y otros depredadores.

Vacunas de acción retardada

Primera y recuerdos, todo en una sola dosis

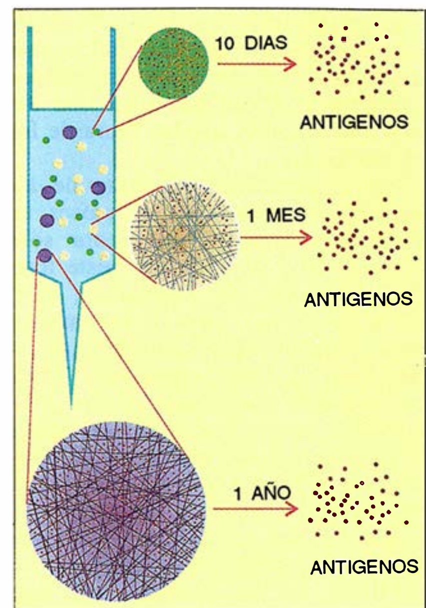
En muchos países en vías de desarrollo, las campañas de vacunación cubren sólo del 60 % al 80 % de la población; muchos, además, no se presentan luego para recibir las necesarias dosis sucesivas: la proporción de sujetos vacunados disminuye entre un 15 y un 30 % en cada recuerdo. Según Paul-Henri Lambert, responsable del programa OMS/PNUD para la puesta a punto de vacunas de la Organización Mundial de la Salud, las campañas de vacunación serían más eficaces si los sujetos vacunados recibieran la vacuna y los recuerdos en una misma dosis. ¿Es una utopía? No parece tal, después de los progresos registrados en la investigación.

La necesidad de una vacuna con tales características se impone en el caso del tétanos. En los países en vías de desarrollo, mueren cada año por esta enfermedad más de medio millón de infantes: en el momento del parto, el cordón umbilical entra en contacto con la tierra, donde el bacilo es omnipresente, y las toxinas del microorganismo invaden el sistema nervioso del niño. Los servicios sanitarios pretenden vacunar a las mujeres embarazadas o en edad fértil con el fin de que sus anticuerpos antitetánicos protejan a sus hijos: esta vacunación pasiva del feto es efectiva siempre que la madre reciba numerosos recuerdos.

Para paliar abandonos y negligencias se han desarrollado vacunas, la antitetánica entre ellas, que se liberan progresivamente y que contienen la dosis de vacunación inicial y los recuerdos. Muchos equipos de trabajo están dedicados a poner a punto estas vacunas retardadas, especialmente los de H. Bethke e I. Esparza, de la Sociedad *Sandoz-Pharma*, y el de R. Langer, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Por ello, han incluido los antígenos de la vacuna en microsferas que actúan como reservorios de donde se van liberando progresivamente. Las microsferas están formadas por poliésteres de ácido poliláctico, por poliésteres de ácido poliglicólico o por copolímeros de ambos compuestos; se preparan mediante separación de fase o por vaporización. En el primero de estos métodos, los antígenos se disuelven en una fase orgánica y el polímero en otra. Se crea una emulsión de dos fases y posteriormente se precipita microsferas de 10 a 400 micrometros de diámetro. De ese modo, se obtienen inclusiones de antígenos dentro de las microsferas del polímero. El otro método consiste en una vaporización simultánea de soluciones orgánicas del polímero y del antígeno: se crean partículas en las que el antígeno se encuentra en los intersticios de la trama polimérica, con un tamaño inferior a 10 micrometros.

Una vez en el organismo, estos polímeros se hidrolizan. Cuando se han degradado, liberan ácido láctico y ácido glicólico, que son sustancias metabólicas naturales. Ya se han utilizado copolímeros de poliláctico y poliglicólico con fines quirúrgicos en implantes e hilos de sutura. Al "disolverse", las microsferas liberan los antígenos, que inducen la formación de anticuerpos. La velocidad con la que estos polímeros se hidrolizan depende de su composición: ajustando la proporción de ambos polímeros y el tamaño de las partículas, se consiguen velocidades de degradación de las microsferas que varían aproximadamente entre dos semanas y 24 meses. De este modo, la vacuna antitetánica consiste en administrar en una sola dosis un conjunto de microsferas que contienen los antígenos y que se hidrolizan siguiendo un calendario preciso: la constitución de las microsferas es tal que una tercera parte de las mismas se hidrolizan inmediatamente, otra tercera parte libera los antígenos entre uno y dos meses después y el resto lo hace a los nueve meses de la inyección.



LAS MICROSFERAS más pequeñas liberan los antígenos en primer lugar: sería la primera dosis de la vacuna. Las otras liberan los antígenos según un calendario preciso: a los treinta días y doce meses, que serían los recuerdos de la vacuna, introducidos al mismo tiempo que la primera dosis.

John Eldridge, en Birmingham (Estados Unidos), ha medido las concentraciones de anticuerpos antitoxina tetánica en animales de laboratorio, y ha demostrado que la síntesis de estos anticuerpos sigue la planificación del calendario previsto: se observa un primer pico alrededor de un mes después de la inyección, un segundo pico a los cinco meses y repunte de la concentración tres meses más tarde.

Además de su composición, el tamaño de las partículas es un elemento esencial. Las microsferas no deben superar los 10 micrometros para que puedan captarlas los macrófagos

que presentan los antígenos al sistema inmunitario, que reacciona rápidamente sintetizando los anticuerpos específicos. Si las partículas son demasiado grandes, quedan fuera de los macrófagos.

En la actualidad, el coste de las vacunas utilizadas en los países en vías de desarrollo representa sólo entre el 10 y el 15 % del coste total de la campaña de vacunación, y, si el coste de las nuevas vacunas es algo superior al de las antiguas, el beneficio de una vacunación única compensaría esa diferencia. Las dificultades para administrar las dosis necesarias y los costes de la infraestructura médica —y, por consiguiente, los costes de la vacunación— se reducirían con la utilización de estas vacunas retardadas. Sin embargo, los médicos intentan disminuir aún más estos gastos desarrollando una vacuna de administración por vía oral: tal vacuna sería más eficaz, menos molesta y evitaría los riesgos de contaminación por jeringuillas eventualmente contaminadas por los virus del SIDA o de la hepatitis *B*.

Sin embargo, el paso por el estómago conlleva dos dificultades: las partículas no deben ser degradadas y poseer un tamaño inferior a cinco micrometros para que puedan atravesar la mucosa intestinal y sean captadas por las células de la mucosa que presentan los antígenos al sistema inmunitario celular local.

La inmunidad adquirida en la mucosa intestinal se transmite a las otras mucosas del organismo. A fin de mejorar la fijación de las microsferas en la pared intestinal, los investigadores han injertado en su superficie proteínas con una afinidad elevada por esta mucosa y que favorecen la penetración de las microsferas. La vacuna oral contra el tétanos se encuentra en fase de experimentación con animales.

Estas vacunas de liberación programada se destinarán en primer lugar a la población del Tercer Mundo, pero se habrán de emplear también en los países industrializados, donde la cobertura de las campañas de vacunación es en ocasiones similar a la que se deplora en los países en vías de desarrollo.

Los ensayos con seres humanos para la vacuna tetánica deberían empezar antes del verano de 1992. En cuanto se haya demostrado la eficacia de esta vacuna, habrá que seguir con la de la difteria, la tos ferina o la hepatitis *B*. El objetivo de la investigación es el de combinar de siete a ocho vacunas, es decir, de siete a ocho tipos de microsferas que contendrían los antígenos específicos, liberándolos en períodos determinados: en una sola inyección, los sujetos recibirían entre siete y ocho vacunas con sus correspondientes recuerdos.

Ecología marina

Mareas internas y transporte larvario

Muchos peces e invertebrados marinos tienen un ciclo de vida en el que los individuos adultos son visibles, con capacidad de desplazamiento autónomo, aunque también pueden vivir asociados al fondo, mientras que los juveniles son minúsculos, sin gran capacidad de desplazamiento, por lo que se encuentran a merced de las corrientes. La fase larvaria de los organismos bentónicos puede durar de horas hasta meses; transcurre en hábitats pelágicos, diferentes y casi siempre distantes de los ocupados por los adultos. Al finalizar esta etapa, las larvas suelen hallarse muy alejadas de los hábitats adultos, por lo que dependen de mecanismos exteriores de transporte para regresar y completar sus ciclos de vida.

En la búsqueda de soluciones al problema de la reintegración de las larvas en los hábitats de los adultos se ha conjugado la ecología marina con la oceanografía física. Los resultados obtenidos se dejan sentir en el estudio de muchos fenómenos poblacionales que, si bien se producen en ambientes costeros, podrían depender de los juveniles que se recluten en las poblaciones adultas, más que de las interacciones trenzadas durante la fase adulta.

Me propongo introducir aquí la importancia que el transporte de larvas hacia los hábitats de los adultos tiene para la ecología bentónica y describir luego un mecanismo sometido a prueba recientemente: el rompimiento de la marea interna. Lo he vertido al español por macareo interno (del inglés "internal tidal bores"), en atención a un efecto análogo causado por la marea en algunos ríos. El macareo interno podría ser crucial para el transporte de larvas hacia la zona costera, como expuse el año pasado en *Science*.

La noción de abasto en ecología marina. Una rama muy activa de la ecología marina, la ecología de comunidades bentónicas, ha centrado sus esfuerzos en la investigación experimental sobre los procesos que estructuran las comunidades de aguas someras en sustratos duros (desde arrecifes coralinos hasta la zona rocosa intermareal). Investigación tras investigación, se ha demostrado que la competencia, la depredación y las alteraciones físicas y biológicas constituyen los factores dominantes de la estructura de tales comunidades. Recientemente se ha despertado el interés, entre los estudiosos, por abordar "la cuestión del abasto" (del inglés "supply side ecology"). Un primer planteamiento sugiere que, en muchos hábitats, las densidades poblacionales y la estructura de las comunidades podrían estar determinadas por el bajo número de reclutas juveniles que se reincorporan a las poblaciones adultas, más que por las interacciones biológicas o las alteraciones del medio físico, en que se ha apoyado la explicación tradicional. Podemos generalizar esa noción y aplicarla al estudio de los efectos que los procesos hidrodinámicos ejercen sobre las comunidades bentónicas.

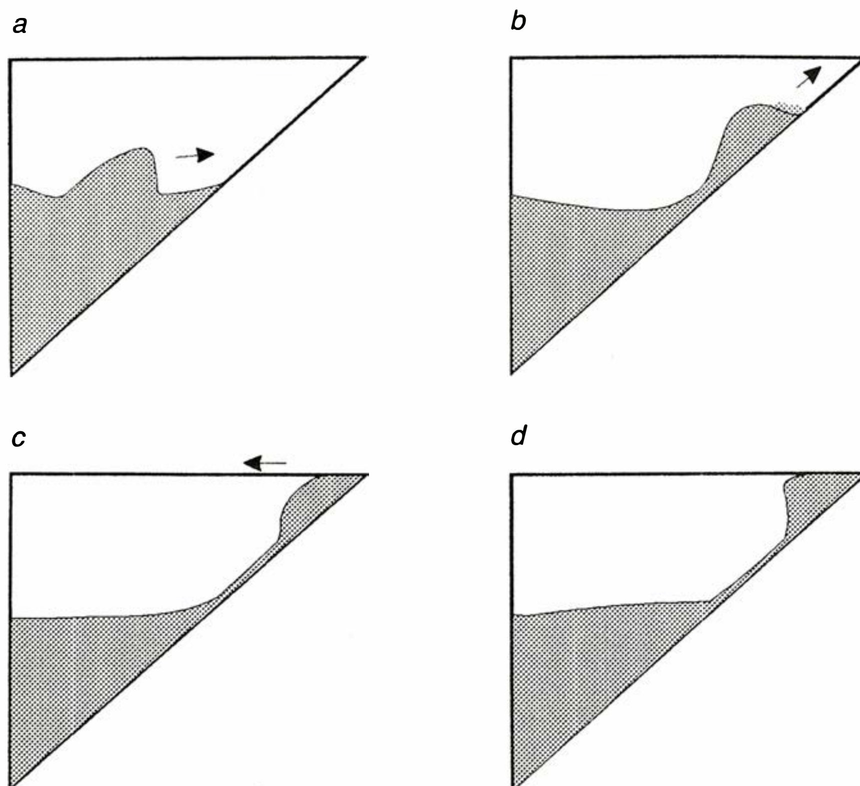
Pero la ecología intermareal se ha mostrado remisa a reconocer el papel de los procesos hidrodinámicos en la estructura de las poblaciones o comunidades bentónicas, lo que contrasta con la misión preponderante que se les ha asignado en ecología pelágica, una rama en la que ignorar los procesos hidrodinámicos podría equipararse a ignorar los procesos evolutivos en ecología poblacional terrestre.

La función principal de la idea de "abasto" en ecología marina consiste en precisar los mecanismos físicos que afectan el transporte de las larvas. El punto de partida es simple: puesto que las larvas se encuentran a merced de las corrientes, el problema se reduce al estudio y medida de su interacción, en cuanto objetos semipasivos, con las fuerzas físicas que las transportan.

Macareo interno. Igual que existen olas en la superficie del mar, también hay ondas internas que viajan, a mucho menor velocidad, entre capas de diferente densidad. En el océano, las diferencias de densidad suelen venir determinadas por gradientes de salinidad y temperatura, cuya importancia relativa varía con el sistema en consideración. Si atendemos a las costas templadas observaremos que en muchas existe un ciclo estacional de estratificación en aguas someras; las aguas se estratifican allí por efecto térmico durante los meses de primavera-verano y pierden esa estratificación en otoño-invierno. Con ello, se produce un ciclo correspondiente, en el que se observan ondas internas sólo en pri-

mavera y verano. Las ondas internas son tan comunes como las olas y se originan al perturbase el medio.

Llámanse "mareas internas" las ondas internas con frecuencia diurna o semidiurna. La marea interna viene generada por la interacción entre corrientes de marea y relieves topográficos submarinos (bancos o plataforma continental). Cuando las corrientes de marea fluyen hacia mar adentro sobre bajos, se forma una onda transitoriamente estacionaria que, al remitir las corrientes, se "suelta" y avanza hacia la zona costera. Se han documentado mareas internas con amplitudes de más de 30 metros y longitudes de onda calculadas de varios kilómetros. La marea interna produce corrientes en dirección lo mismo paralela que perpendicular a la costa; el sentido de la dirección varía con la profundidad: las corrientes cerca del fondo y las cercanas a la superficie tienen sentidos opuestos. Al igual que las olas, las ondas internas rompen cuando adquiere cierto valor la profundidad con respecto a la longitud de onda (*véase la figura*). Sin embargo de estas importantes observaciones, es poco lo que se ha investigado sobre el efecto de rompimiento de las mareas internas; nuestro artículo de *Science*, antes mencionado, fue la primera incursión en este efecto hidrodinámico en su relación con el transporte de larvas.



MODELO ESQUEMATIZADO del macareo interno. Las secciones triangulares representan perfiles de costa en diferentes tiempos y los cuerpos oscuros simbolizan masas de agua de mayor densidad. Las larvas de varias especies de invertebrados marinos suelen hallarse asociadas a estas capas de mayor densidad durante la primavera y el verano.

Tras una investigación desarrollada en el sur de California, me convencí de que las consecuencias del macareo interno tenían bastante mayor alcance del que hasta entonces se le había reconocido. Se trata de un fenómeno capaz de producir afloramiento de aguas más densas en la zona cercana a la costa (de 5 a 10 metros de profundidad, cuando menos), que viene a provocar una brusca caída en la temperatura superficial de hasta 3 o 5 grados C. Además, el macareo interno condiciona el régimen de temperaturas en esta zona por varios días —observaciones que habían sido explicadas anteriormente por afloramiento causado por transporte de Eckman—, y esos enfriamientos son predecibles en el ciclo lunar. Si el macareo interno transporta aguas subsuperficiales, de termoclina somera, hacia la costa, también puede transportar cualquier material que se encontrara suspendido en ellas.

Macareo interno y transporte de larvas. Cualquier hipótesis que se idee para explicar el transporte de larvas hacia la costa debe contrastarse con la opinión dominante, de acuerdo con la cual las larvas son atrapadas por ciertas corrientes superficiales convergentes, producidas por las ondas internas. En su progreso hacia la costa, las corrientes superficiales avanzan con las ondas internas, convirtiéndose de ese modo en el transporte larvario. Independientemente de las críticas que desde el punto de vista físico pudieran hacerse a este mecanismo, éste exige que las larvas queden atrapadas en la película superficial. Y habida cuenta de que el macareo interno es el responsable del transporte, síguese que las larvas deberían hallarse entre las capas de diferente densidad o cerca del fondo. Queda claro que ambos mecanismos operan sólo en condiciones en que la columna de agua se encuentre estratificada.

Pero, ¿ocurren así las cosas? En puntos próximos a la costa de California, descubrí que las larvas de cirrípedos, celentéreos, briozoos y otros invertebrados abundaban cerca del fondo más que en la superficie; ello sugiere que las larvas son transportadas por un mecanismo operante en aquel nivel y no en la superficie. Por otro lado, hallé una correlación negativa entre la temperatura del agua, indicadora del macareo interno, y las tasas de fijación larvaria de cirrípedos. Ambos resultados corroboran la hipótesis según la cual el mecanismo por el que las aguas frías llegan a la costa es el mismo que transporta las larvas. La hipótesis del macareo interno explica también con rigor y parsimonia picos en asentamiento larvario que se registran alrededor de cada quince días y que habían sido tomados como sólida prueba corroboradora de la hipótesis de transporte en corrientes de convergencia.

Resulta obvio que el macareo interno, hasta ahora prácticamente ignorado, podría constituir uno de los fenómenos de mayor importancia en el transporte de organismos y otros tipos de materia en dirección perpendicular a la costa. El macareo interno podría desempeñar un papel crucial no sólo en el transporte larvario, sino también en la dispersión y acarreo de contaminantes vertidos al mar. En ambas líneas, la biológica y la física del macareo interno, avanzan las investigaciones de mi laboratorio. (Jesús Pineda, de la Institución Scripps de Oceanografía, Universidad de California en San Diego.)

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Impacto de una gota de agua

Hacía mucho tiempo que me rondaba por la cabeza. ¿Una fijación infantil? De niño, las tardes lluviosas de invierno pegaba mi nariz a la ventana y seguía el reguero de las gotas que golpeaban el cristal, o sacaba la mano para aprehender, en su caída, aquellos goterones inmensos de las tormentas estivales, no sé porqué, placenteros. Había fotografiado ya, varias veces, la cortina de agua, ese tapiz inacabado de hilos que forma la lluvia en su caída. Pero quería sorprender el impacto de una gota contra la superficie lisa y dura.

Tras varios intentos fallidos, renuncié a fotografiar ese instante al natural. Caen muchas gotas a la vez, y, si bien puedo proteger la máquina, se me empaña la lente y el sensor provoca un efecto molesto de distorsión.

Me las ingenié para simular el meteoro, el tamaño de cada gota (entre 0,5 y 5 milímetros) y su velocidad de caída (unos 2 metros por segundo). Para el diámetro de la gota, que quise fuera de 4-5 milímetros, me serví de una probeta especial; si deseamos que alcance una velocidad de caída de 9 metros por segundo, tendremos que situar el origen a 10 metros de altura, por lo menos. No es fácil lograr que la gota caiga, desde esa altura, sobre el punto donde tenemos enfocado el objetivo. Salvé el escollo, y evité los caprichos del viento a la vez, con un tubo largo por donde discurriera el agua.

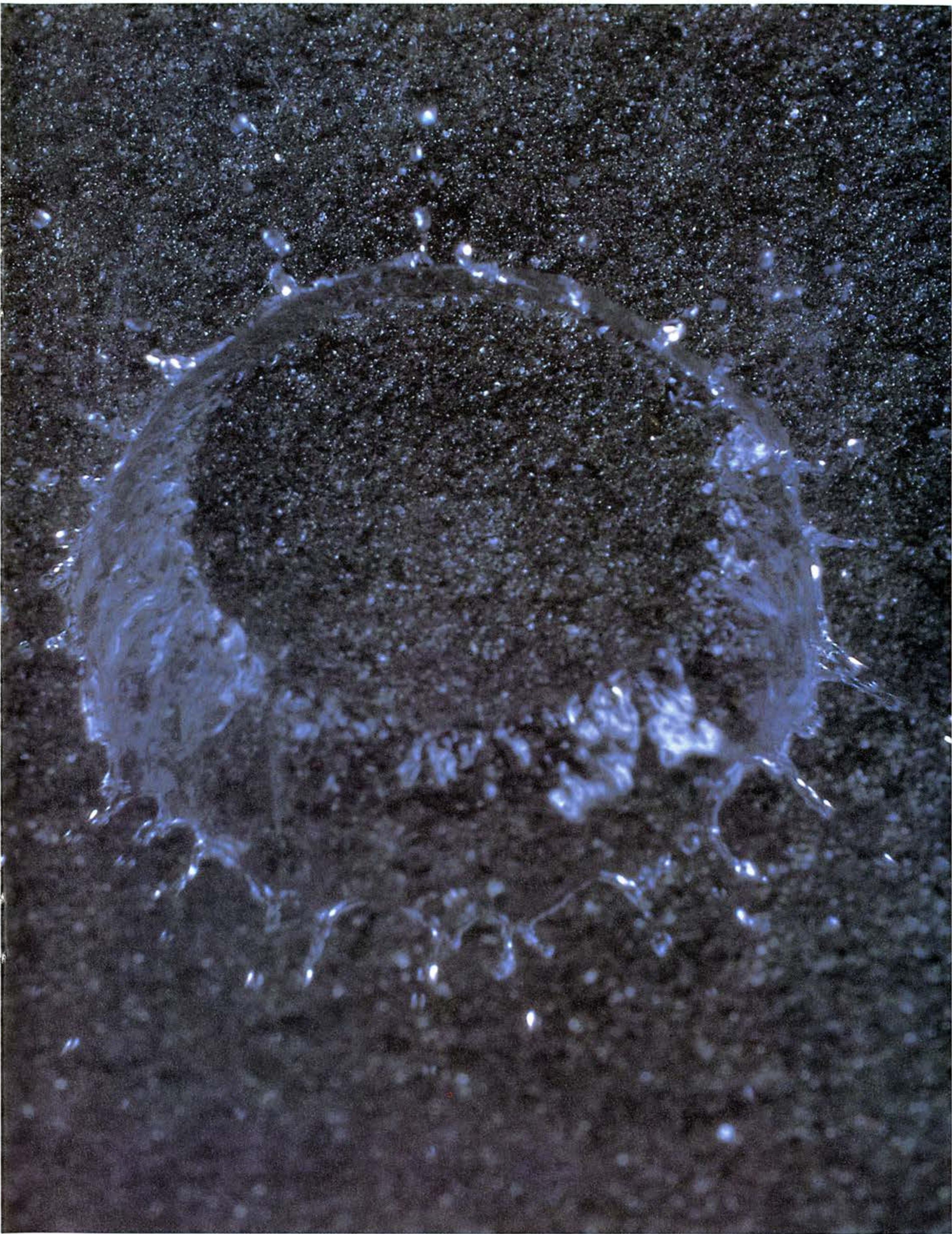
El flash electrónico me permitió perfilar con nitidez la secuencia de pasos del choque. Parecía una célula primigenia cuyos pseudópodos buscaran aferrarse al suelo. ¿Se inspiraron en ello los que vieron en gotas similares el origen de la vida?

Foto de la derecha
distancia focal: 80 mm macro
diafragma: F = 22
exposición: 1/22.000 de segundo
película: ISO = 100









Mamíferos de la isla de Europa

En una mina de Messel se han conservado, en un estado espléndido, fósiles de los mamíferos que recorrían Europa cuando ésta era una isla. La recuperación de los restos nos devuelve un momento decisivo de la historia evolutiva

Gerhard Storch

Hace 50 millones de años un lago cubría la actual localidad minera de Messel, a 20 kilómetros de Frankfurt. Los animales se acercarían a beber de sus aguas engañosamente tranquilas. Rondarían por la orilla, se bañarían en las zonas más someras o se colgarían de las ramas suspendidas sobre el agua. Los murciélagos constituirían las víctimas ideales mientras sobrevolaban las zonas más profundas, rasando su superficie rizada en persecución de insectos.

En esos momentos y a intervalos demasiado largos para que los animales pudieran darse cuenta de la existencia de cualquier pauta, una nube de gas venenoso alcanzaría súbitamente la superficie, asfixiando a todas las criaturas a su alcance. (Hay constancia fidedigna de sucesos de ese tipo. Sin ir más atrás, hace seis años un lago de Camerún arrojó una nube de dióxido de carbono y mató a miles de personas y animales.) En cada explosión de gas, el lago de Messel arrojaría sus amplias redes, enviando una nueva cosecha de animales hacia el fondo del lago. Allí, las condiciones tóxicas preservaron frecuentemente los tejidos blandos hasta el extremo de que podemos, a menudo, distinguir la piel de un roedor, las escamas de un pangolín, los huesos del oído interno de un animal e, incluso, el contenido de su última pitanza. Los fósiles dieron cuerpo a una capa de fangos bituminosos que crecía lentamente en el fondo del lago.

Ningún otro lugar ha proporcionado una colección de fósiles tan diversos y completos del Eoceno, la época comprendida entre hace 53 y 35 millones de años, cuando Europa era una isla subtropical. Los mamíferos de Messel, procedentes del comienzo del Eoceno medio, revisten particular interés porque nos dan una pista para adentrarnos en el período más revolucionario que los mamíferos europeos conocieron nunca: el Eoceno inferior. Aunque sólo nos han llegado fósiles muy fragmentarios de esta época, la reconstrucción de las rutas de dispersión de los animales nos muestra que hablamos de un tiempo en que la fauna europea primitiva quedó expuesta a la invasión en masa de una fauna moderna. Los mamíferos advenedizos forzaron la extinción de buena parte de los nativos; la mayoría de los mamíferos de Messel descienden de los invasores.

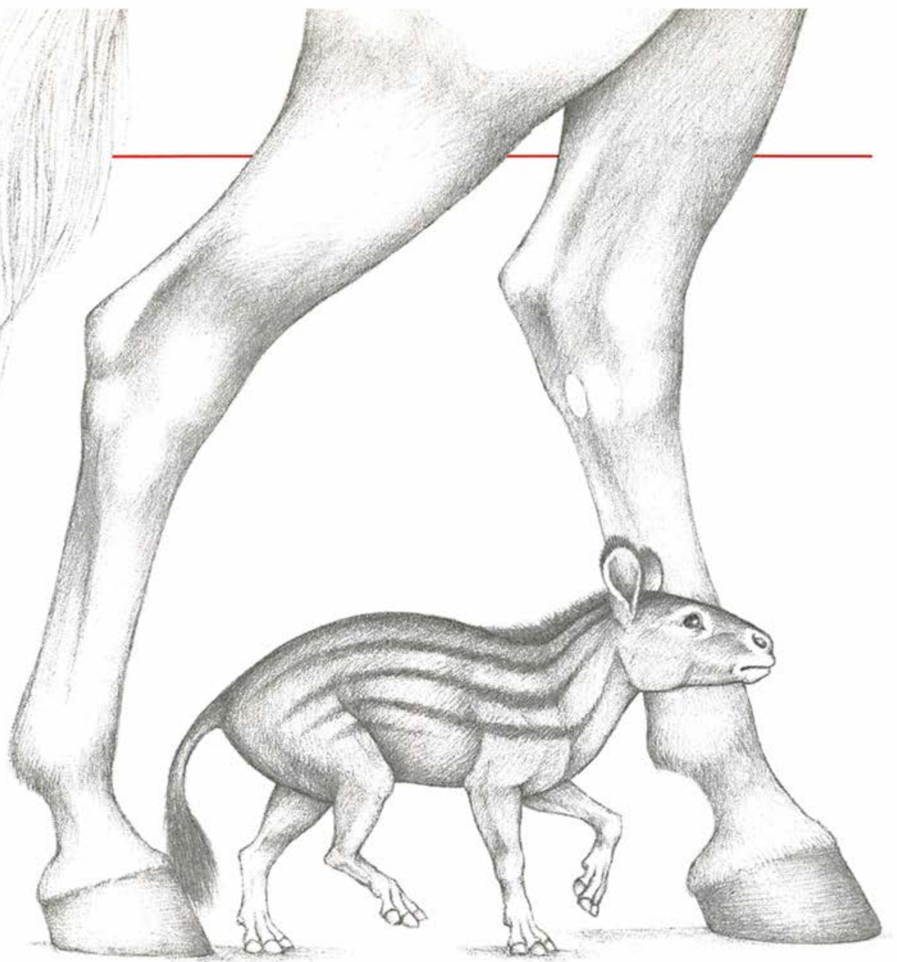
Nos ocuparemos aquí principalmente de los "nuevos", de su lugar de procedencia, rutas y descendientes más probables, cuestiones realmente espinosas. Más fácil, empero, resulta explicar el éxito fulgurante de los invasores frente a las formas nativas. Los recién llegados sufrieron un proceso de selección más exigente, por la presumible razón de que venían de un lugar donde existía una cohorte formidable de organismos competidores. En cualquier caso, la nueva fauna creó un ejército más equilibrado que el viejo. Incluía, por ejemplo, los primeros animales con pezuñas, tanto con dedos pares como impares. Estos pacedores parecen haber ocupado nichos ecológicos hasta entonces vacíos. Entre los invasores había grupos que, más tarde, alcanzarían un gran éxito, los prosimios sobre todo, fundadores del orden de los primates al que pertenece el *Homo sapiens*.

Los animales de Messel llenan un escenario que, a modo de fotografía instantánea, pone ante nuestros ojos un período de medio a un millón de años, el tiempo de vida del lago. Cuando terminaba la primera cuarta parte del Eoceno, el lago se secó; parte de su lecho y el de los tributarios que lo habían alimentado los redujo a polvo la actividad tectónica y la erosión natural. Millones de años más tarde, los mineros excavaban en la zona sin modificar en busca de pizarras con petróleo; dejaron una explotación a cielo abierto de un kilómetro de largo, 700 metros de ancho y 70 metros de profundidad. La zanja corrió varios años peligro de rellenarse hasta que, en 1986, el estado de Hesse declaró a Messel una reserva natural.

Las técnicas adecuadas para la protección de la integridad de los fósiles conservados en pizarras aparecieron hace veinte años escasos. Desde entonces, sin embargo, se ha reconocido que, gracias a la variedad de los hallazgos de Messel, se ha enriquecido el debate sobre el origen y dispersión de las unidades sistemáticas (especies y familias). El yacimiento ha suministrado ya ejemplares de más de 40 especies de mamíferos correspondientes a 14 órdenes, diversidad que crece con el análisis de nuevos materiales. Se han reconstruido algunos organismos contando con el perfil de los cuerpos blandos, que se ha conservado, y con esqueletos articulados; son los casos en que, menos la coloración de la piel, el fósil aparece entero. Otros se han reconstruido mediante un proceso similar al despliegue o ahuecamiento de una caja de cartón aplastada.

La nueva fauna que invadió Europa parece haber quedado aislada al poco de su llegada, por la razón ve-

GERHARD STORCH dirige la sección de mamíferos fósiles del Instituto de Investigación y Museo de Historia Natural Senckenberg de Frankfurt am Main. En 1967 se doctoró en zoología, en la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt. Se ha especializado en paleontología de vertebrados y dirigido campañas de excavación en Mongolia e islas del Mediterráneo.



1. EL CABALLO ACTUAL haría parecer pequeño a cualquier équido del Eoceno (*arriba*). La especie fósil *Propalaeotherium messelense* (*abajo*) tenía, como todos los équidos primitivos, molares con coronas más bajas y una estructura más simple que la de los caballos. Se cree que la transición dental refleja un cambio en la dieta, de hojas de rama arbórea a hierba de las praderas. Los hallazgos de Messel corroboran esta visión: el intestino de *Propalaeotherium* contiene hojas fosilizadas.

rosímil de que se cortaron las rutas terrestres de invasión. Además, ciertas partes de Europa estaban, en algunos casos, separadas de otras por someros brazos de mar, convirtiéndola en un archipiélago más que en una isla. Y, como ocurre en los archipiélagos modernos, los mamíferos colonizadores experimentaron una rápida diferenciación local. Tal diferenciación, llamada endemismo, aparece incluso en organismos tan móviles como los murciélagos. El endemismo tiende a borrar los rastros de vínculos genealógicos, dificultando así la interpretación de algunos mamíferos de Messel.

Aunque los mamíferos invasores derivan claramente de linajes que se originaron fuera de Europa, el lugar de origen exacto suele ser un misterio. Además, para responder a esta cuestión, debe primero determinarse qué ejemplares derivaron de los invasores y cuáles del puñado de supervivientes indígenas europeos; pero contamos con muy pocas pruebas. Cuanto se sabe del Cretácico superior —una época comprendida entre hace 100 y 65 millones de años— es lo que ha podido inferirse a partir de un molar del sur de Francia y algunos fragmentos dentarios de Portugal.

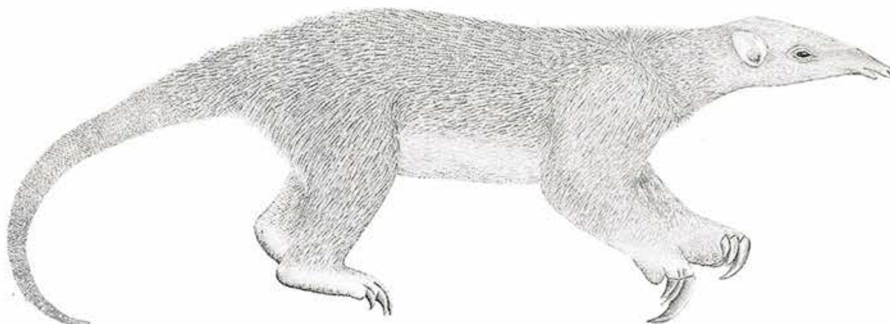
Completamente en blanco está el registro del Paleoceno inferior, período que sigue al límite Cretácico-Terciario, hace 65 millones de años. Los únicos posibles precursores de los nativos europeos de Messel, que conozcamos, proceden del Paleoceno medio y superior de Bélgica, de la cuenca de París y de Walbeck, en Alemania. Pero estos mamíferos fósiles, endémicos y arcaicos, no originaron las familias modernas. Por contra, cierta especie procedente de Messel sí constituye un probable candidato para ocupar el rango de nativo europeo arcaico; hablo de *Leptictidium nasutum*, un curioso mamífero bípedo.

¿De dónde venían, pues, los recién llegados? De Asia es inverosímil: poseía una fauna distinta y estaba separada de Europa por una vía marítima transcontinental. Con todo, los pangolines y otros pudieron haber salvado esa barrera.

Norteamérica —entonces separada de Sudamérica— parece una cuna más probable para ciertos grupos. Había dos puentes intercontinentales que conectaban aquélla con Europa durante el Eoceno inferior, a pesar de la expansión del canal que, más tarde, se convirtió en el Atlántico Norte. Las condiciones climáticas favorables habrían permitido el paso con

Devueltos a la vida

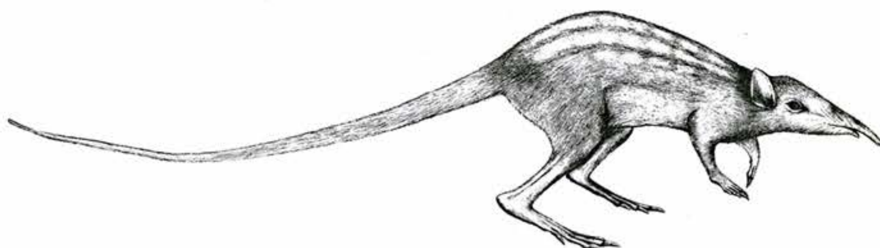
Los fósiles de la página contigua fueron reconstruidos partiendo de contornos del cuerpo blando y esqueletos articulados. De esta manera todo, excepto el color de los animales, puede ser recuperado.



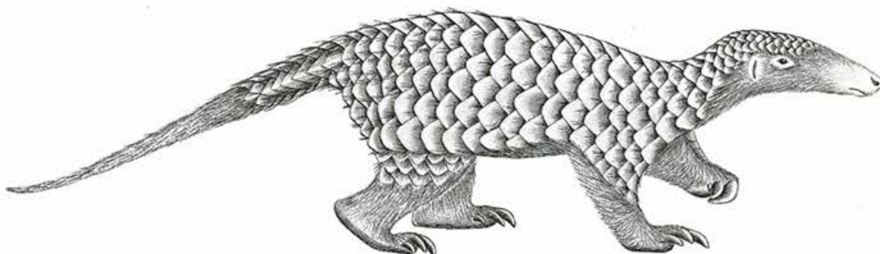
***EUROTAMANDUA JORESI*, el más antiguo y más completo oso hormiguero fósil encontrado hasta la fecha, medía unos 80 centímetros de largo desde la nariz hasta la cola.**



***PHOLIDOCERCUS HASSIACUS*, un insectívoro con aspecto de erizo, medía unos 40 centímetros de largo.**

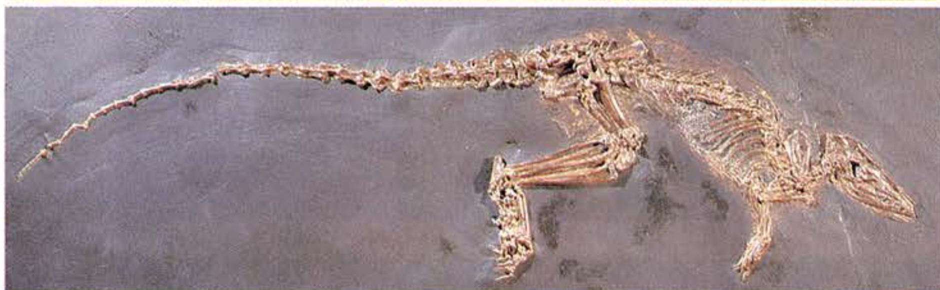


***LEPTICTIDIUM NASUTUM* corría de forma bípeda, a diferencia de cualquier mamífero actual excepto *Homo sapiens*. Medía 75 centímetros.**



***EOMANIS WALDI*, el pangolín más antiguo conocido, se parece a las especies actuales. Este animal de 50 centímetros comía hormigas y termitas.**






bastante libertad a aquellos mamíferos capaces de franquear todas las zonas ecológicas de los puentes. Hasta un 60% de los géneros conocidos en el Eoceno inferior europeo se han identificado también en los sedimentos de las Montañas Rocosas. Las radicales innovaciones faunísticas del Eoceno inferior tuvieron lugar simultáneamente en Norteamérica y en Europa, y algunos expertos integran tales áreas en una misma zona geográfica: Euramérica.

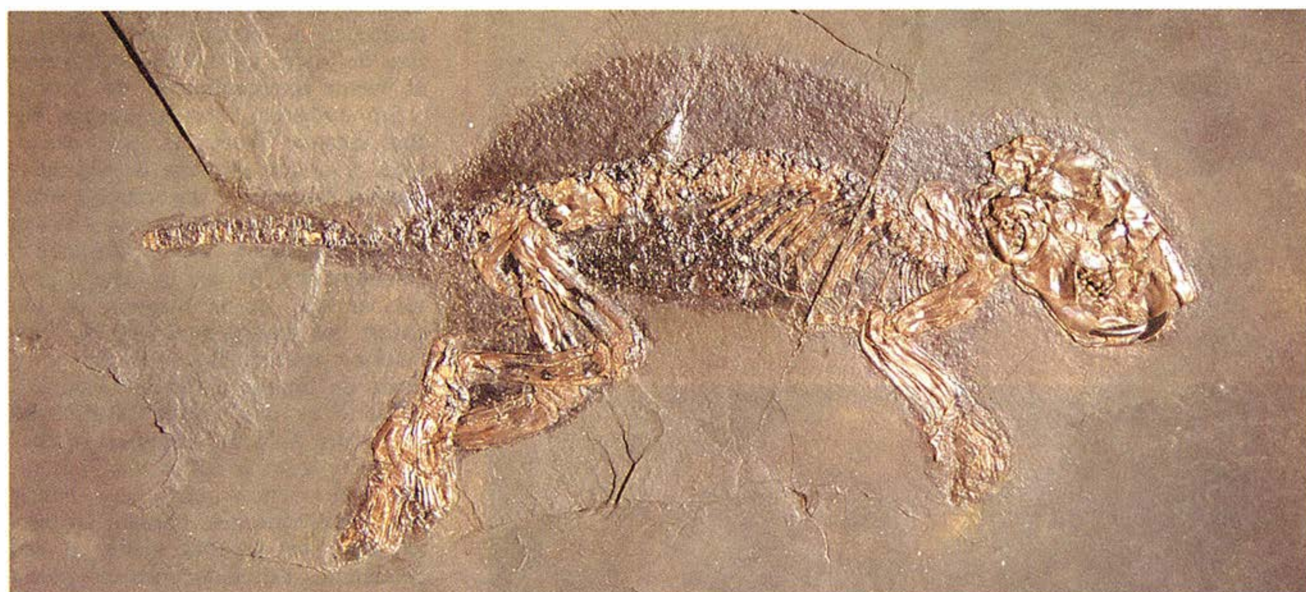
La mayoría acepta que el flujo de dispersión procedió de Norteamérica a Europa. Hay pruebas claras de algunos casos. Los carnívoros modernos, por ejemplo, parecen haberse originado en Norteamérica. Su tronco, el grupo de los miácidos, aparece en el Paleoceno inferior de Estados Unidos, pero no se encuentra en Europa hasta el Eoceno inferior, unos 10 millones de años más tarde. Los roedores se encaminaron también hacia Europa, pero, a diferencia de los carnívoros, habían llegado a Norteamérica no mucho antes: originarios de Asia, los roedores cruzaron el puente intercontinental de Bering.

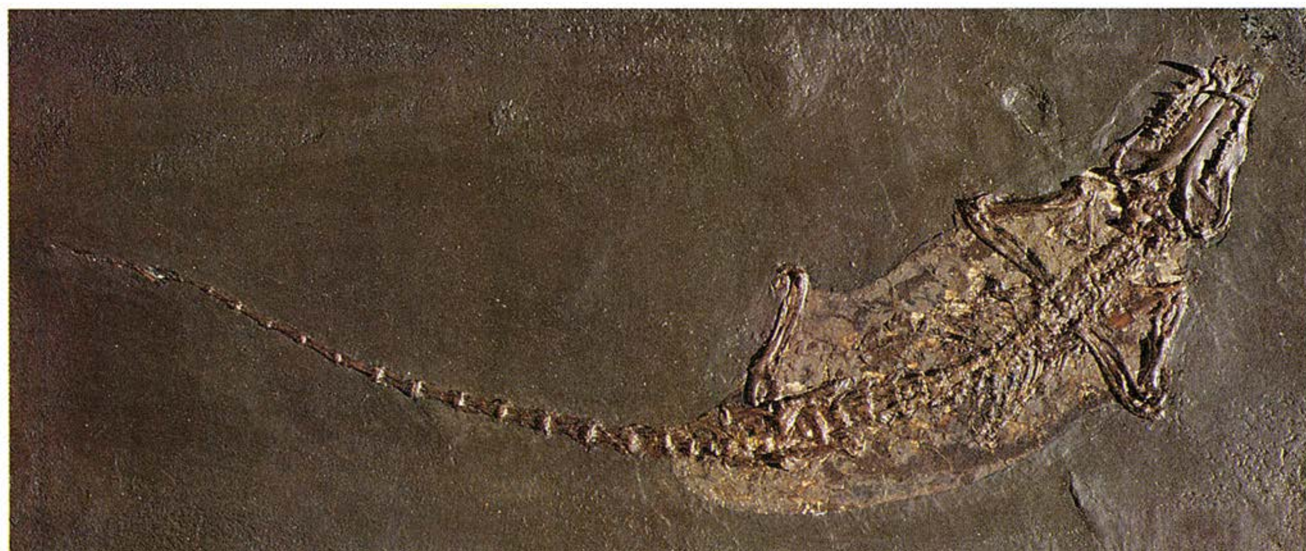
Sin embargo, existen pruebas varias, aunque indirectas, que descubren el origen africano de múltiples taxones sumamente importantes. A tenor de ello, esos mamíferos pisarían primero Europa y, de ahí, pasarían a Norteamérica. En eso me apoyo para afirmar que, en la mayoría de los casos, los inmigrantes del Eoceno inferior fueron hacia el oeste, es decir, de Europa al Nuevo Mundo.

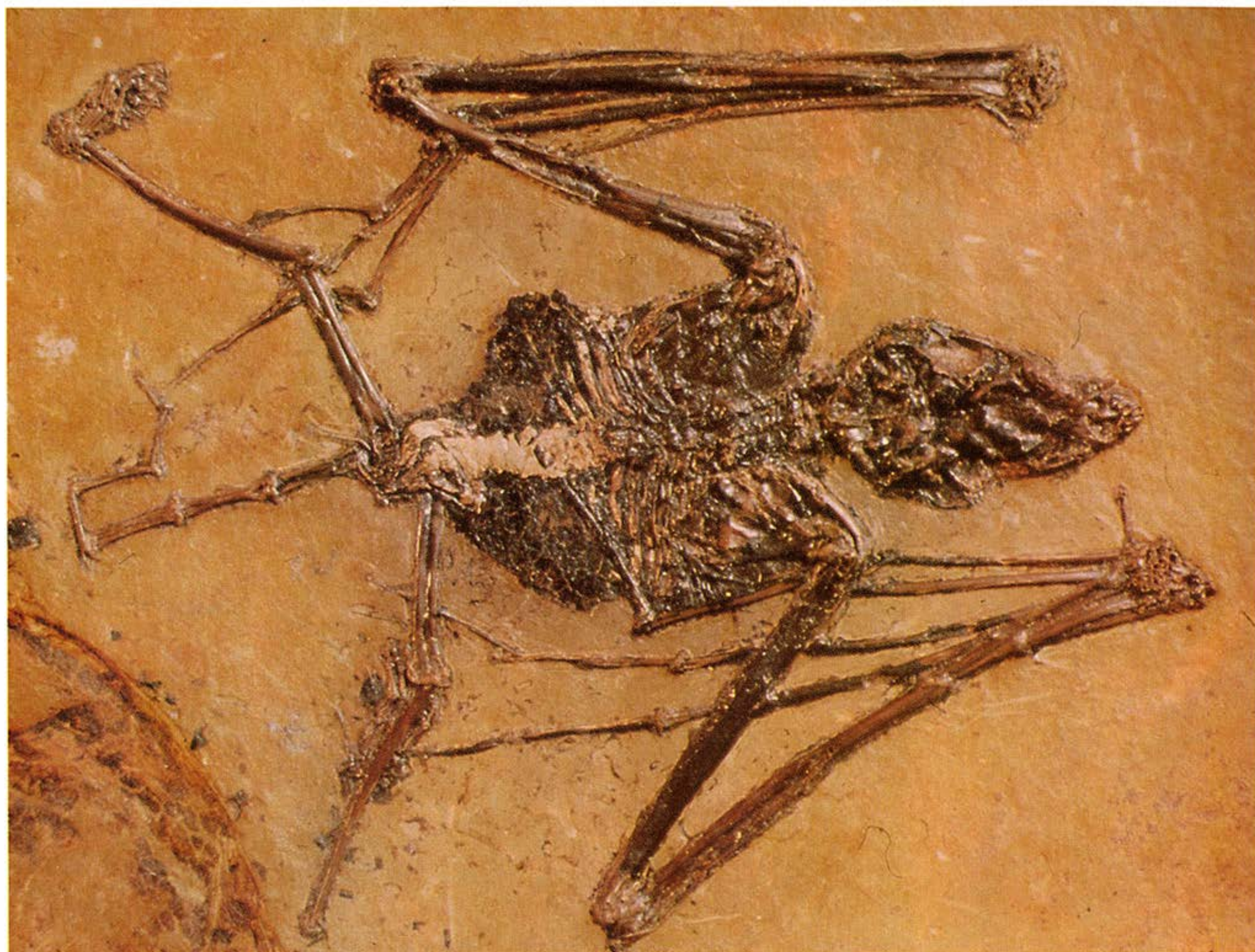
Cierto es que resulta insuficiente el registro fósil de Africa en lo concerniente a los períodos más tempranos y nos vemos obligados a inferir los inicios africanos, basados en buena parte en pruebas ajenas a ese continente. Así, deducimos una patria africana para cualquier población que carezca de una población correlativa contemporánea o anterior en Asia y que, obviamente, haya alcanzado Europa antes que Norteamérica. Podemos citar, a modo de ejemplos, el *Hyracotherium* (el género de caballos más antiguo), *Diacodexis* (el género más antiguo de artiodáctilos, grupo que incluye a los cerdos, vacas y cabras) y los prosimios con aspecto de lemúridos, los primeros primates de apariencia moderna. Una vez en Europa, estos inmigrantes asomaron antes en el sur que en el norte, justamente lo que cabe esperar si Africa fuera su lugar de origen.

Hasta que se descubrió en el sur de Europa el progenitor del caballo, la mayoría aceptaba que ese antepasado, lo mismo que su forma









2. TRAMPA DE MURCIELAGOS. Los fósiles de Messel exceden en número a los de otros mamíferos, probablemente porque fueron a menudo sorprendidos sobre el lago cuando éste lanzaba sus gases. El intestino de *Palaeochiropteryx tupaiodon* (*arriba*) contenía polillas que volaban al caer la tarde o durante la noche, señal de que los murciélagos empleaban la ecolocación hace ya 50 millones de años. Un insectívoro, *Macrocranion tupaiodon* (*página contigua, arriba*), cazaba también en la oscuridad como lo evidencia el buen desarrollo de sus oídos y de su nariz y la presencia de ojos minúsculos. *Masillamys beegeri* (*centro*) era un roedor. Un marsupial con aspecto de opossum (*abajo*) está todavía sin clasificar.

moderna (*Equus*), había evolucionado en Norteamérica. Los restos europeos rebaten esa hipótesis. Abundando, los fósiles de Messel permitieron suponer un origen africano para los modernos primates. Esta predición encontró su confirmación el año pasado con el descubrimiento de un fósil de primate del Paleoceno en la cordillera del Atlas.

Pero quizás el espécimen que mayor interés reviste, por sí mismo y por lo que revela sobre las migraciones antiguas, sea el oso hormiguero *Eurotamandua joresi*, desenterrado en Messel en 1974. Es el más viejo y mejor conservado de su suborden, los Vermilingües, del orden Desdentados, al que pertenecen también los perezosos y los armadillos. No se han hallado restos fósiles de este orden en los sedimentos geológicos apropiados de Norteamérica; por consiguiente, es casi seguro que estos animales no llegaron de Norteamérica procedentes de América del Sur.

Siguieron, se ha dicho, la ruta africana. Opinión que se funda en la angostura del canal proto-Atlántico en el Cretácico superior y Terciario inferior: se formaron pasillos terrestres intermitentes entre Sudamérica y Africa hasta el Cretácico Superior y quizás, incluso, en el Paleoceno inferior. Además, varias crestas del fondo en expansión del océano Atlántico sobresalieron del agua hasta el límite Eoceno-Oligoceno, hace unos 35 millones de años, creando de esta forma una especie de paso de río.

A mí me atrae otra interpretación. Aunque el *Eurotamandua* de Messel vivió hace 50 millones de años, poseía ya todos los caracteres altamente complejos y diacríticos de los géneros actuales *Tamandua* (oso hormiguero menor) y *Myrmecophaga* (oso hormiguero gigante). El ejemplar fósil sugiere así un origen para los osos hormigueros que se remonta muy adentro del Cretácico.

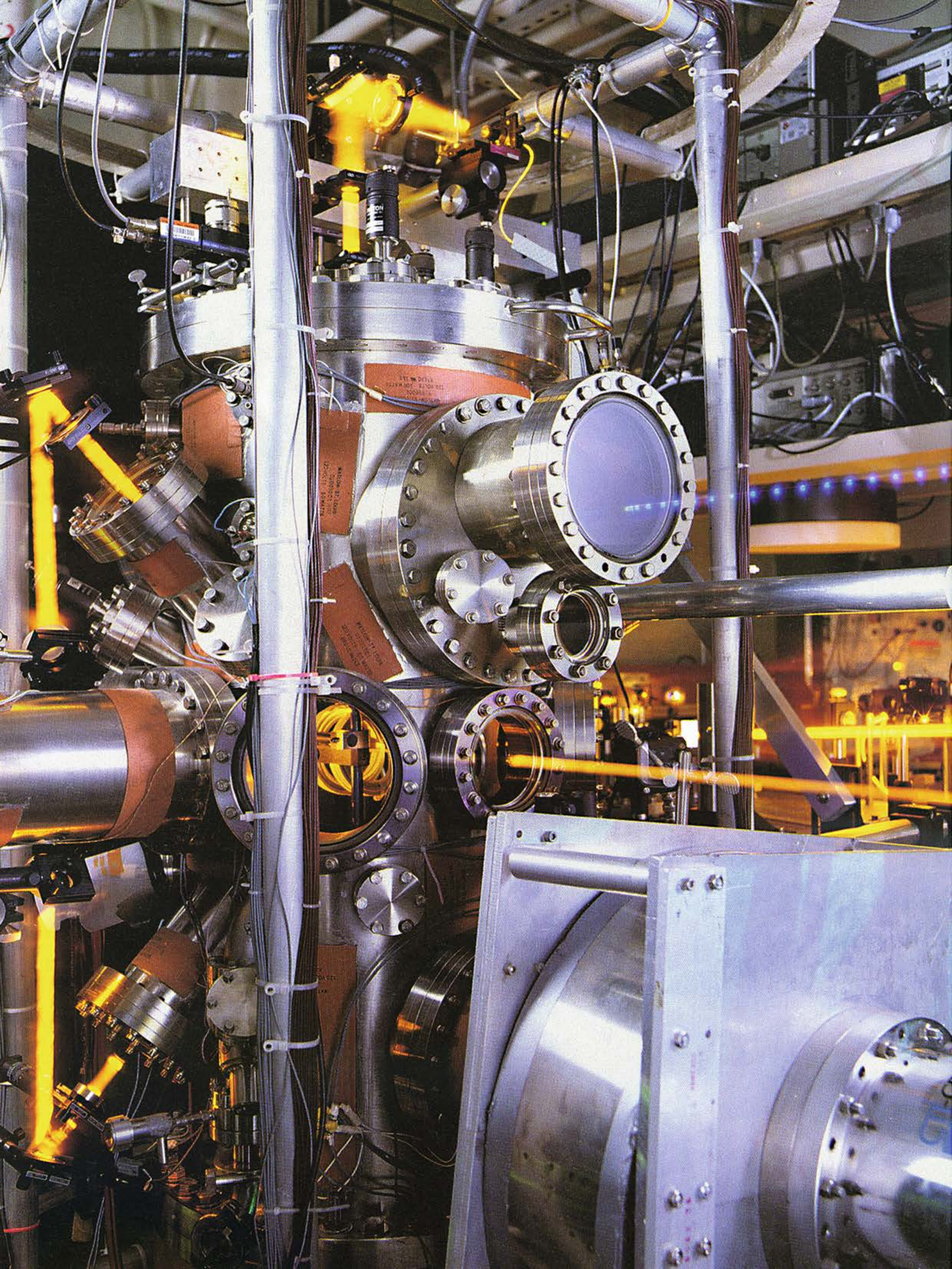
Los rasgos primitivos que han mantenido los desdentados actuales han provocado que la mayoría de los paleontólogos y zoólogos los reputen el grupo más arcaico de mamíferos placentarios vivientes. Podrían muy bien haber existido antes de que Gondwana occidental, supercontinente del sur, se rompiera en Africa y Sudamérica hace unos 90 millones de años. De acuerdo con ese enfoque, los desdentados ocuparon Africa hace muchísimo tiempo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAMMALIAN PALEOFAUNAS OF THE WORLD. Donald E. Savage y Donald E. Russell. Addison-Wesley Publishing, 1983.

DER EOZÄNE MESSELSEE: EOCENE LAKE MESSEL. Dirigido por J. L. Franzen y W. Michaelis. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 1988.

MESSEL: INSIGHT INTO THE HISTORY OF LIFE AND OF THE EARTH. Dirigido por Stephan Schaal y Willi Ziegler. Oxford University Press (en prensa).



Trampa de láser para partículas neutras

Los láseres pueden utilizarse para atrapar y manipular partículas eléctricamente neutras, lo que a su vez permite enfriar vapores hasta cerca del cero absoluto, desarrollar relojes atómicos y estirar moléculas de ADN

Steven Chu

Antes de pasar otra página de esta revista, fíjese por un momento en lo que hace. Cada vez que desea volver una página, debe colocar un dedo encima del papel y otro debajo. La distancia entre cada dedo y el papel viene a ser el diámetro de un átomo: los electrones de la superficie de sus dedos repelen a los electrones de cada lado de la página. Esta ligera redistribución de cargas produce un campo eléctrico de intensidad suficiente para permitirle tomar la página entre sus dedos. Vale, pues, la pena destacar que, mediante la aplicación de fuerzas eléctricas a escala atómica, podemos asir objetos que, en conjunto, son eléctricamente neutros.

En cambio, la manipulación de objetos neutros de tamaño atómico constituye un reto técnico endiablado. Cuesta mucho menos controlar los objetos dotados de carga porque los campos eléctricos y magnéticos pueden ejercer fuerzas mucho más intensas sobre ellos. Así, durante más de un siglo, los científicos han aplicado fuerzas electromagnéticas para manipular a distancia partículas dotadas de carga: iones y electrones; pero hemos tenido que aguardar hasta hace poquísimo para trasladar sin especial esfuerzo partículas neutras.

En particular, se han desarrollado instrumentos que utilizan láseres para atrapar y manipular átomos y partículas de un micrometro de tamaño, y hacerlo con un control sorprendente. Innovaciones de las que se están beneficiando un sinfín de aplicaciones. Mi grupo de investigación y otros han enfriado átomos hasta temperaturas próximas al cero absoluto, condiciones que nos permiten examinar estados cuánticos de la materia e interacciones insólitas entre la luz y los átomos ultrafríos. Hemos empezado a desarrollar relojes atómicos y acelerómetros de finísima precisión. La técnica ha entrado ya en el dominio de la manipulación de las macromoléculas, polímeros por ejemplo. Y hemos diseñado unas "pinzas ópticas" que utilizan haces láser para asir y trasladar orgánulos del interior celular sin perforar las membranas intermedias.

Casi diez años antes de que los expertos aprendieran a controlar partículas neutras a distancia mediante luz láser, habían logrado algunos de esos objetivos mediante campos magnéticos. Aplicaron campos para focalizar los átomos en haces y confinarlos. Tras saber cómo atraparlos con luz láser, se encaminaron hacia el diseño de múltiples técnicas de láser que posibilitaran un control preciso de las partículas neutras.

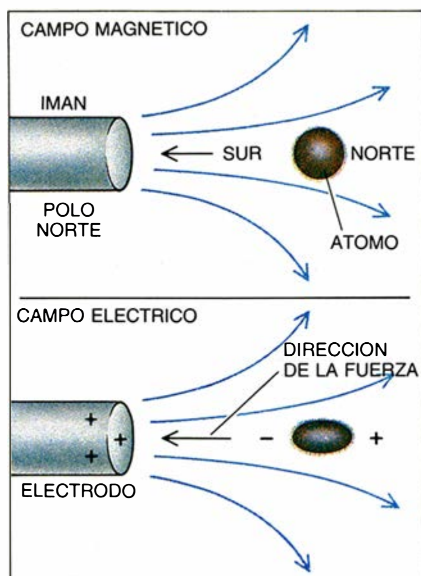
La primera trampa de partículas neutras la creó Wolfgang Paul, de la Universidad de Bonn. En 1978, consiguió, con la ayuda de sus colaboradores, atrapar neutrones en un campo magnético. Siete años más tarde, partiendo de los mismos principios, el equipo de William D. Phillips, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas, atrapaba, o confinaba, átomos.

La trampa magnética puede retener partículas que posean propiedades magnéticas parecidas a las de un pequeño imán. Precisando más, la partícula debe tener un pequeño momento dipolar magnético. Si una tal partícula se coloca en un campo magnético cuya intensidad varíe de una zona a otra, se moverá hacia la parte del campo más débil, o más intensa, según sea la orientación de la partícula. Paul advirtió la posibilidad de diseñar un campo magnético con un mínimo local de la intensidad del campo; si el dipolo magnético está originalmente alineado de suerte que avance hacia la posición en la que el campo sea más débil, permanecerá alineado en la orientación "tendente al campo débil" [véase "Enfriamiento y confinamiento de átomos", por W. D. Phillips y H. J. Metcalf; INVESTIGACION Y CIENCIA, mayo de 1987].

Los átomos pueden también atraparse mediante luz láser. La luz ejerce una fuerza sobre átomos y otras partículas neutras porque posee momento. Si bombardeamos un átomo con un haz de luz de una frecuencia determinada, absorberá y emitirá fotones, cuantos de luz, sin cesar. A medida que absorba fotones, el átomo recibirá una ráfaga de impulsos de momento en la dirección en que se propaga el haz luminoso. Los impulsos se suman a fin de producir una fuerza de "colisión" ("scattering force"), que es proporcional al momento de cada fotón y al número de fotones que el átomo dispersa cada segundo. Por cada fotón que el átomo absorbe, debe emitir otro. Ahora bien, como los fotones se emiten sin ninguna dirección privilegiada, los

1. ASI BRILLAN LOS HACES DE LASER en una cámara de vacío que contiene una fuente de átomos. Los haces se utilizan para enfriar y atrapar los átomos cerca del fondo del aparato. Una vez confinados, los átomos se empujan hacia arriba; pero la fuerza de la gravedad los hace volver cuando se hallan en la cima, donde podemos acometer mediciones precisas de los estados energéticos de los átomos. Los puntos luminosos azules representan pulsos de radiación ultravioleta que sondean los átomos.

STEVEN CHU es director del departamento de física y titular de la cátedra Theodore y Frances Geballe de Humanidades y Ciencias de la Universidad de Stanford. Doctorado en física en 1976, entró dos años después en los laboratorios AT&T Bell. En 1983 se convirtió en director del departamento de investigación en electrónica cuántica, de donde pasó a enseñar física y física aplicada en Stanford.



2. CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS: pueden ejercer fuerzas sobre átomos, aun cuando éstos sean sólo ligeramente magnéticos y eléctricamente neutros. Un átomo sometido a un campo magnético será arrastrado hacia la región de campo más intenso, si el polo sur del átomo apunta hacia el polo norte del campo. Un átomo sometido a un campo eléctrico será también atraído hacia la región de campo más intenso. El campo eléctrico atrae hacia sí las cargas negativas del átomo, mientras que repele las positivas. Como resultado de la nueva distribución de carga, el átomo se sentirá atraído hacia la barra cargada positivamente.

cambios de momento producidos por la emisión dan un promedio nulo. La absorción y la emisión tienen el efecto resultante de empujar el átomo en la dirección en que viaja la luz.

La intensidad de esta fuerza de "colisión" es bastante baja. Si un átomo absorbe un solo fotón, su cambio de velocidad es muy pequeño en comparación con la velocidad media de los átomos de un gas a temperatura ambiente. (El cambio es del orden de un centímetro por segundo, la velocidad de avance de una hormiga, mientras que un átomo a temperatura ambiente se mueve a la velocidad de un reactor supersónico.)

Esta fuerza de colisión se detectó en 1933, cuando Otto R. Frisch la utilizó para desviar un haz de átomos de sodio. Preparó los átomos convirtiendo en vapor sodio de un recipiente. Para formar el haz, dejó que los átomos salieran a través de un agujero y de una serie de ranuras. Una vez preparado el haz, lo bombardeó con luz de una lámpara de sodio. Aunque, en promedio, cada átomo de sodio absorbía sólo un fotón, Frisch detectó una ligera deflexión del haz.

La fuerza de colisión que Frisch generó, excesivamente débil, no podía capturar átomos. Decenios más tarde, los investigadores observaron que la tasa de dispersión de los fotones podía elevarse hasta más de diez millones de fotones por segundo, lo que correspondía a una fuerza 100.000 veces más intensa que la gravitatoria de la Tierra. La primera demostración espectacular de la fuerza de colisión sobre átomos la acometieron sendos grupos independientes, dirigidos, respectivamente, por Phillips y John L. Hall, en el Instituto Nacional de Pesos y Medidas. En 1985 detuvieron un haz de átomos y redujeron la temperatura de los mismos desde los 300 kelvins (temperatura ambiente) hasta 0,1 kelvin.

La potencia de la fuerza de colisión alcanzable mediante láseres avivó la esperanza de poder ir más allá de detener los átomos: atraparlos. Pero cuantos esfuerzos se hicieron por configurar varios haces laséricos capaces de recoger y concentrar átomos en alguna región del espacio fracasaron. De acuerdo con el teorema de Earnshaw, no se puede construir una trampa luminosa a partir de cualquier configuración de haces luminosos si la fuerza de colisión es proporcional a la intensidad de la luz. El inconveniente estriba en que los haces no pueden disponerse de suerte tal que generen sólo fuerzas dirigidas hacia dentro. Cualquier luz que entre en una zona de confinamiento habrá de acabar por escapar y llevarse consigo fuerzas dirigidas hacia fuera.

Para nuestra fortuna, podemos fundar la trampa atómica en otra clase de fuerza que la luz ejerce sobre los átomos. Para hacernos una idea de la misma, prestemos atención a la atracción que experimentan partículas pequeñas por un objeto dotado de carga positiva, por ejemplo, una barra de vidrio que hemos frotado sobre la piel de un gato. La barra produce un campo eléctrico que polariza la partícula. En consecuencia, la posición media de las cargas positivas de la partícula estará ligeramente más lejos de la barra que la posición media de las cargas negativas. Se dice que esta distribución asimétrica de carga tiene un momento dipolar. La fuerza dipolar de atracción, ejercida por el campo eléctrico sobre las cargas negativas de la partícula, es más intensa que la fuerza repulsiva sobre las cargas positivas; por ello, la partícula se siente atraída hacia las regiones donde el campo eléctrico es más intenso. Obsérvese que esta fuerza es análoga a la fuerza dipolar magnética utilizada que primero se empleó para atrapar neutrones y átomos. Si la carga de la barra fuera negativa, el campo eléctrico induciría un momento dipolar de polaridad invertida, y la partícula se vería atraída hacia las regiones de campo eléctrico elevado.

En virtud de la fuerza dipolar, podemos confinar (atrapar) los átomos mediante un campo eléctrico que tenga un máximo local en algún punto del espacio. ¿Podrían producirse tales campos con una disposición inteligente de cargas eléctricas? Para cualquier sistema de cargas fijas, la respuesta es que no. Pero sí podemos crear un campo eléctrico con un máximo local en sistemas dinámicos. En concreto, y debido a que la luz está formada por campos eléctricos y magnéticos en vertiginosa oscilación, el haz láser focalizado produce un campo eléctrico alternante con un máximo local. Cuando el campo interacciona con un átomo, altera la distribución de los electrones en su entorno, induciendo, por tanto, un momento dipolar eléctrico. El átomo se verá así atraído hacia el máximo local del campo, lo mismo que la partícula se sentía atraída hacia la barra.

El hecho de que el campo eléctrico cambie con tanta rapidez no representa ningún problema. Cuando el campo cambia la polaridad, se invierte también el momento dipolar del átomo. Mientras el campo cambie con un ritmo más lento que las frecuencias de oscilación naturales del átomo, el momento dipolar permanecerá alineado con el campo. El átomo continúa, por tanto, moviéndose hacia el máximo local. De lo que se infiere que podemos aprovechar esa fuerza dipolar para confinar átomos. En 1968 Vladilen S. Letokhov propuso que los átomos podían atraparse en un haz de luz utilizando la fuerza dipolar; diez años después, Arthur Ashkin, de los laboratorios AT&T Bell, sugería una trampa más práctica basada en haces láser focalizados.

Aunque la trampa de fuerza dipolar es de concepción elegante, no está libre de problemas de realización. Para minimizar la fuerza de dispersión, la luz debe sintonizarse bastante por debajo de la frecuencia a la que los átomos absorben fácilmente fotones. A estas frecuencias alejadas, las fuerzas de atrapamiento resultan tan débiles que ni siquiera los átomos enfriados hasta 0,01 grados Kelvin se retienen en la trampa. Y aun cuando cayeran en la trampa átomos más fríos, no tardarían muchas milésimas de segundo en escapar debido a la permanente dispersión de fotones. Además, la tarea de inyectar átomos en la trampa parecía imposible debido a que su volumen sería de sólo 0,001 milímetros cúbicos.

Ante esa situación, el confinamiento óptico se presentaba como una tarea de titanes. Pero, en 1985, apareció el esquema de una trampa óptica manejable después de que se enfriaran átomos en todas direcciones mediante láseres a temperaturas mucho más bajas que las de los haces atómicos detenidos. La idea de enfriamiento por láser la propusieron Theodor Hänsch y Arthur Schawlow, de la Universidad de Stanford, en 1975. Ese mismo año David J. Wineland y Hans G. Dehmelt, de la Universidad de Washington, avanzaban un esquema parecido para enfriar iones atrapados mediante láseres.

Predijeron la posibilidad de enfriar un átomo si se irradiaba desde dos lados con luz láser de una frecuencia ligeramente inferior a la necesaria para la máxima absorción. Si el átomo se mueve en dirección opuesta a uno de los haces luminosos, la luz, desde la perspectiva del átomo, aumenta su frecuencia. Muy probablemente, el átomo absorberá la luz cuya frecuencia ha aumentado; y esa luz absorbida ejercerá de fuerza de colisión que frenará al átomo.

¿Qué le ocurre al átomo con la luz que viaja en su misma dirección? La probabilidad de absorción es aquí menor; desde el punto de vista del átomo, la luz ha disminuido de nuevo la frecuencia; del efecto global ejercido por el par de haces resulta la generación de una fuerza de colisión que se opone al movimiento del átomo. El átomo que proceda en la dirección opuesta también experimentará una fuerza de colisión que le llevará a velocidad cero. Rodeando el átomo con tres conjuntos de haces que se propaguen en direcciones opuestas según tres ejes mutuamente perpendiculares, podrá enfriarse en las tres direcciones.

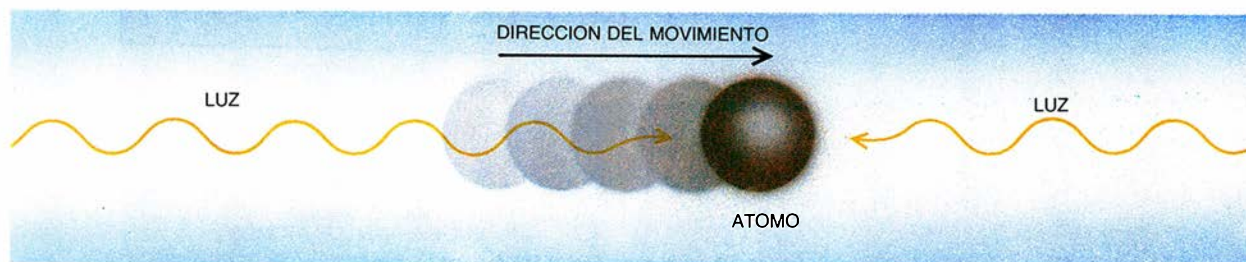
En 1985 Ashkin, Leo Hollberg, John E. Bjorkholm, Alex Cable y el autor enfriaron, en los laboratorios AT&T Bell, átomos de sodio a 240 millonésimas de kelvin. Por actuar el campo luminoso a modo de fuerza viscosa, bautizamos con la expresión "melaza óptica" la combinación de haces láser utilizada para crear la fuerza de frenado. Sin tratarse de ninguna trampa, los átomos permanecían confinados en el medio viscoso durante períodos largos, de 0,5 segundos, hasta que lograban escapar de los haces enfriantes.

Las melazas ópticas nos permitieron resolver los tres problemas principales que aparecían en la construcción de una trampa laserica. Primero: enfriando los átomos a temperaturas bajísimas podíamos reducir los movimientos térmicos aleatorios de los átomos, facilitando su confinamiento. Segundo, podíamos colocar sin mayor dificultad los átomos en la trampa; bastaría con focalizar el haz atrapante en el centro de la melaza óptica para cazar los átomos cuando vagaran aleatoriamente por el haz. Tercero, alternando entre confinamiento y luz de enfriado podíamos reducir los efectos térmicos de la luz de atrapamiento. Al cabo de un año de refinamiento de las melazas ópticas, atrapábamos átomos mediante la luz.

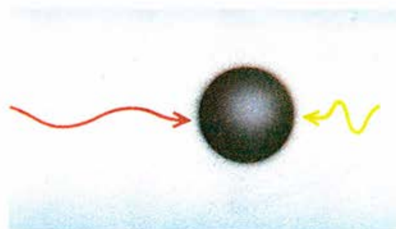
Incluso mediante la técnica de cargado utilizada en nuestra primera trampa, era deseable una trampa óptica con mayor volumen de captura. La trampa que pudiera utilizar la fuerza de colisión necesitaría una intensidad luminosa mucho menor; ello significaba que había que sortear las restricciones impuestas por el teorema de Earnshaw. David E. Pritchard, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Carl E. Wieman, de la Universidad de Colorado, indicaron el camino correcto para diseñar semejante trampa. Si se aplicaban a los átomos, decían, campos eléctricos o magnéticos que variaran en el espacio, la fuerza de colisión debida a la luz láser no sería necesariamente proporcional a la intensidad de la luz.

Esta sugerencia llevó a Jean Dalibard, de la Escuela Normal Superior de París, a proponer una trampa "magneto-óptica" que empleara un campo magnético débil y luz circularmente polarizada. En 1987 el grupo de Pritchard y el mío de AT&T colaboraron en la construcción de la trampa. Tres años después, el equipo de Wieman demostró que esta técnica podía aprovecharse para confinar

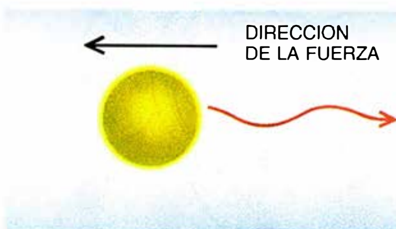
De cómo la luz frena los átomos



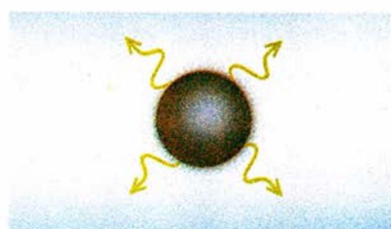
1. Consideremos dos rayos de luz que bombardean un átomo. Un rayo viaja en la misma dirección que el átomo; el otro se mueve en la dirección opuesta. La frecuencia de la luz es ligeramente más baja que la frecuencia a la que el átomo absorbe con facilidad.



2. Desde la perspectiva del átomo, el rayo que se mueve en la misma dirección que el átomo tiene la frecuencia disminuida, y, aumentada, el otro rayo.



3. Es probable que el átomo absorba la luz de alta frecuencia pero no la de baja frecuencia. Empujado, pues, en una dirección opuesta a su movimiento, se frena.



4. La emisión de la luz absorbida empuja el átomo en alguna dirección, pero si el proceso se repite muchas veces, la emisión no ejerce ninguna fuerza resultante.

átomos en una celda de cristal mediante diodos de láser baratos. Su método eliminaba los procesos de preenfriamiento, obligados en nuestros primeros experimentos con trampas. El hecho de que los átomos pudieran atraparse en una celda cerrada significaba también que podrían manipularse ópticamente especies raras de átomos, tales como isótopos radiactivos. La trampa magneto-óptica se ha convertido en la trampa óptica de mayor uso en nuestros días.

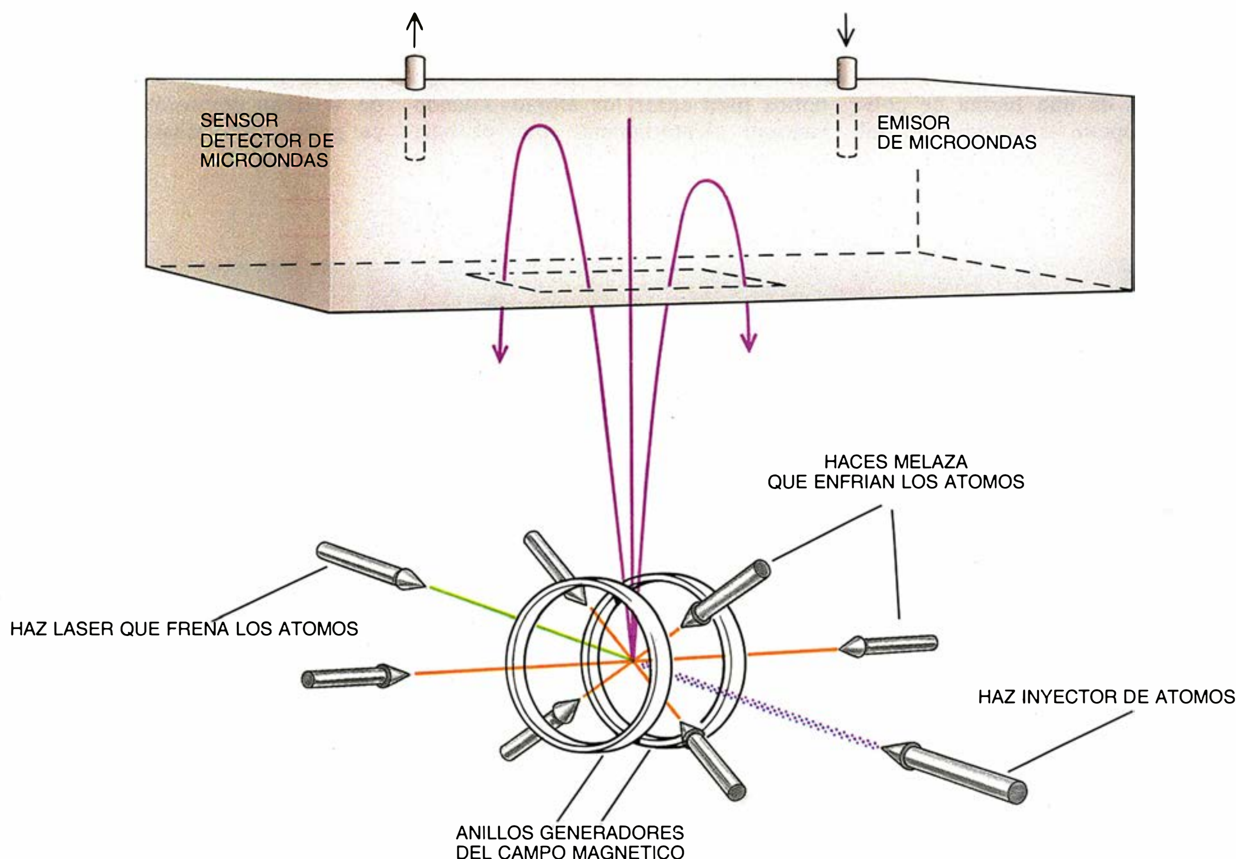
Mientras tanto, se avanzaba a paso firme en enfriamiento por láser. El equipo de Phillips descubrió que, en determinadas condiciones, valía la pena recurrir a las melazas ópticas para enfriar átomos a temperaturas muy por debajo del límite inferior predicho por la teoría vigente. Ante semejante hallazgo, Dalibard y Claude Cohen-Tannoudji, del Collège de France y la Escuela Normal, y mi grupo de Stanford construyeron una nueva teoría de enfriamiento por láser basada en una relación, tan compleja cuan elegante, entre los átomos y su interacción con los campos luminosos. Actualmente los átomos pueden enfriarse a una temperatura de una velocidad media igual a tres retrocesos fotónicos y medio; para átomos de cesio, eso significa una temperatura inferior a los tres microkelvins.

Yendo más allá de las melazas ópticas, Cohen-Tannoudji, Alain Aspect, Ennio Arimondo, Robin Kaiser y Nathalie Vansteenkiste, entonces en la Escuela Normal, inventaron un ingenioso esquema capaz de enfriar átomos de helio por debajo de la velocidad de retroceso de un fotón dispersado. Se han enfriado átomos de helio a dos microkelvins según una dimensión y se está trabajando en ampliar la técnica a dos y tres dimensiones.

Este método de enfriamiento captura un átomo en un estado de velocidad bien definida, de manera muy parecida a como los átomos se atrapaban en el espacio en nuestra primera trampa óptica. Cuando el átomo dispersa los fotones, su velocidad cambia al azar. El experimento francés establece condiciones que permiten que un átomo retroceda y pase a un determinado estado cuántico, combinación de dos estados con dos velocidades diferentes próximas a cero. Una vez instalado en ese estado, la probabilidad de dispersar más fotones es muy baja, lo que significa que no podrán chocar fotones adicionales, ni aumentar la velocidad. Si sucede que el átomo no pasa a ese estado cuántico, continuará dispersando fotones y dispondrá de más oportunidades de alcanzar el estado de baja velocidad deseado. Así pues, los átomos se enfrían dejándoles pasar aleatoriamente a un estado cuántico de "velocidad atrapada".

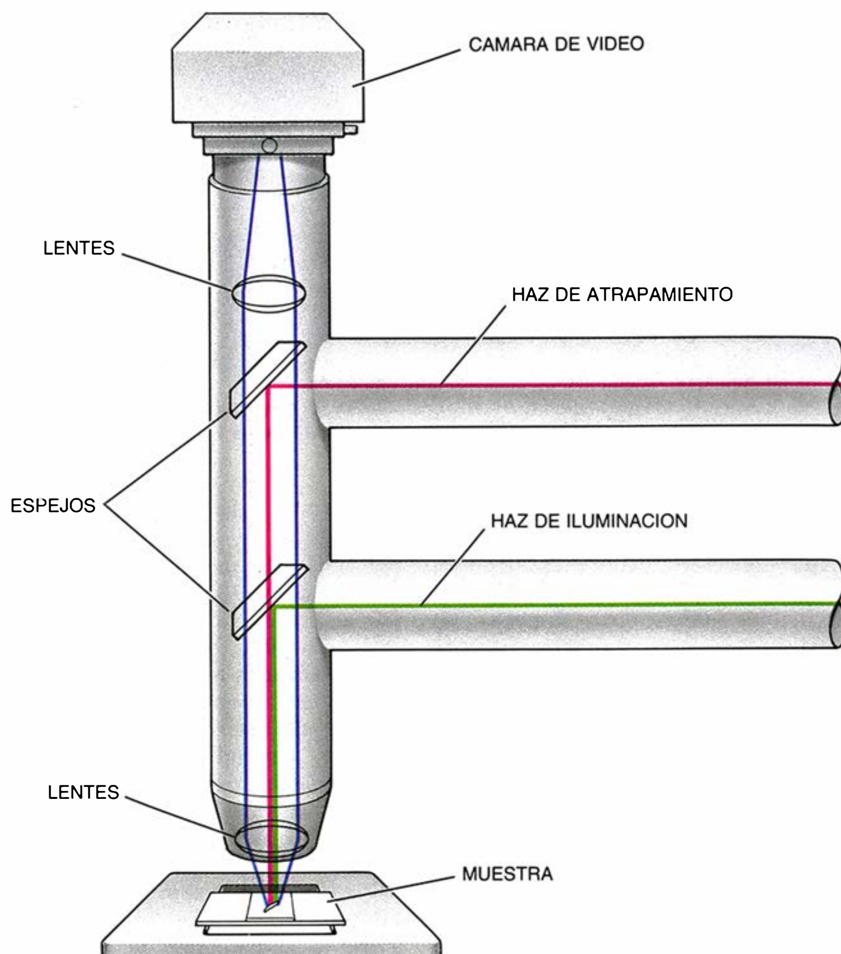
Amén de enfriar y confinar los átomos, los físicos han construido lentes espejos y rejillas de difracción para manipular átomos. También han puesto de moda dispositivos que no tienen contrapartida en óptica luminosa. En Stanford y en la Universidad de Bonn se han construido "chimeneas atómicas", que transforman un conjunto de átomos calientes en una corriente bien controlada de átomos fríos. El grupo de Stanford ha creado un "trampolín atómico" en el que los átomos rebotan de una hoja luminosa que sale de una superficie de vidrio. Con una superficie de vidrio curvada podemos preparar una trampa atómica basada en la gravedad y la luz.

Sí, hemos aprendido a retener confinados los átomos con una facilidad asombrosa; pero, ¿a dónde va-



3. FUENTE ATOMICA para obtener mediciones precisas de los estados energéticos. Un láser inyecta los átomos en el aparato y otro los detiene. Después, los átomos se capturan y enfrían mediante los efectos combinados de un campo magnético y haces luminosos. Cuando hay en la trampa unos 10 millones de átomos, se lanzan hacia arriba. En la cima de la trayectoria, pulsos de microondas excitan el átomo de un estado energético a otro.

mos con esas posibilidades? Con átomos muy fríos y en forma de vapor, podemos abordar la mutua interacción entre ellos a esas bajísimas temperaturas. Según la teoría cuántica, el átomo se comporta como una onda cuya longitud de onda es igual a la constante de Planck dividida por el momento de la partícula. A medida que el átomo se enfría, su momento decrece, y aumenta, por ende, su longitud de onda. A temperaturas bajas, la longitud de onda promedio se hace comparable a la distancia media entre átomos. A esas bajas temperaturas y altas densidades, una fracción significativa de todos los átomos, enseña la teoría cuántica, se condensarán en un estado cuántico fundamental. Esta forma insólita de la materia, conocida por condensado de Bose-Einstein, aunque predicha, no se ha observado nunca en un vapor de átomos. Thomas J. Greytak y Daniel Kleppner, del MIT, y Jook T. M. Walraven, de la Universidad de Amsterdam, están empeñados en crear el condensado de marras en un conjunto de átomos de hidrógeno en una trampa magnética. Otros grupos se afanan en lo mismo, ahora con un conjunto de átomos alcalinos (cesio y litio), enfriado mediante láser.



4. PINZAS OPTICAS para manipular objetos microscópicos. Se coloca una muestra en la platina de un microscopio que ha sido adaptado para admitir luz láser verde y radiación láser infrarroja. La luz verde ilumina la muestra mientras que la radiación infrarroja la atrapa y la sujeta.

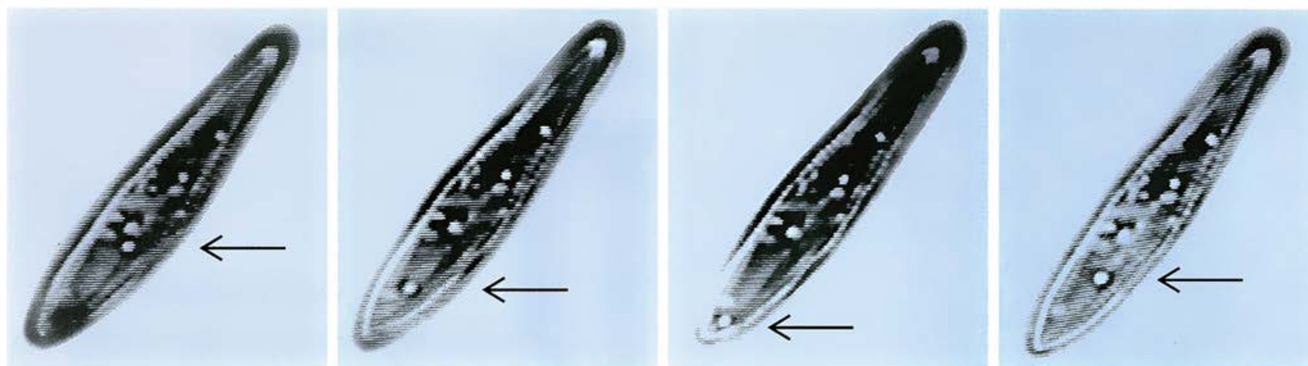
Las técnicas de manipulación de átomos ofrecen nuevas oportunidades en espectroscopía de alta resolución. El grupo de Stanford ha conjugado varias técnicas de ésas y ha construido un dispositivo que permitirá medir las características espectrales de los átomos con una exactitud exquisita. Hemos diseñado una fuente atómica que lanza átomos ultrafríos hacia arriba con suavidad suficiente para que la gravedad los invierta. Los átomos de la fuente se recogen en una trampa magneto-óptica durante 0,5 segundos; tras cuyo intervalo, se lanzan hacia arriba unos 10 millones de átomos, a una velocidad aproximada de dos metros por segundo. En la cima de la trayectoria, se sondea un átomo mediante dos pulsos de radiación de microondas separados en el tiempo. Si la frecuencia de la radiación está bien ajustada, los dos pulsos hacen que el átomo cambie de un estado cuántico a otro. (Norman Ramsey compartió el premio Nobel de física en 1989 por inventar y aplicar esta técnica.) En nuestro primer experimento medimos la diferencia de energías entre dos estados de un átomo con una resolución de dos partes en 100.000 millones.

¿En virtud de qué permite la fuente mediciones tan finísimas? En primer lugar, los átomos caen libremente y son fáciles de apantallar de cualquier perturbación que pudiera alterar sus niveles energéticos. En segundo lugar, tales medidas están limitadas en precisión por el principio de incertidumbre de Heisenberg, que establece que la resolución de una medición energética estará limitada por la constante de Planck dividida por la duración de la "medida". En nuestro caso este tiempo corresponde al tiempo entre los dos pulsos de microondas. Con una fuente atómica, el tiempo de medida de los átomos no perturbados puede durar un segundo, intervalo imposible para átomos que se hallen a temperatura ambiente.

Gracias a las finísimas mediciones de los niveles energéticos de los átomos que la fuente atómica permite, cabe pensar en la adaptación del dispositivo para construir un reloj atómico más sensible. El patrón mundial de tiempo se define hoy mediante la diferencia de energías entre dos niveles energéticos determinados del átomo de cesio. Dos años después de la primera fuente atómica, el grupo de la Escuela Normal utilizó una fuente para medir la "transición del reloj" del átomo de cesio con gran precisión. Estos dos experimentos sugirieron que un instrumento adecuadamente diseñado podría medir la frecuencia absoluta de esta transición con una precisión de una parte en 10^{16}, 1000 veces mejor que la precisión máxima de nuestros relojes. Seducidos por esta posibilidad, hay una decena de grupos empeñados en refinar el patrón de tiempo del cesio mediante una fuente atómica.

Se trabaja intensamente también en otra aplicación, la interferometría atómica. El primer interferómetro atómico fue construido en 1991 por investigadores de la Universidad de Konstanz, del MIT, del Physikalisch-Technische Bundesanstalt y de Stanford.

El interferómetro atómico desdobla el átomo en dos ondas espacialmente separadas. Las dos partes del átomo se recombinan luego y se les deja interferir entre sí. Ocurre tal



5. TRASLADO DE UN ORGANULO de un protozoo hasta un extremo de la célula con pinzas ópticas, tal como se muestra en las tres primeras figuras. La imagen que aparece en el extremo derecho muestra el orgánulo después de su liberación. (Arthur Ashkin.)

desdoblamiento, por citar un ejemplo sencillo, cuando se provoca el paso de un átomo a través de dos rendijas mecánicas separadas. Si el átomo se recombina después de atravesar las rendijas, observaremos franjas de interferencia ondulatorias. Los efectos de interferencia de los átomos demuestran con diamantina nitidez que su comportamiento admite, a un tiempo, una explicación ondulatoria y corpuscular.

Y lo que reviste incluso mayor interés: los interferómetros atómicos ofrecen la posibilidad de medir fenómenos físicos con alta precisión. En la primera demostración de esta potencial sensibilidad, Mark Kasevich y yo construimos un interferómetro que trabajaba con átomos lentos. Los átomos se desdoblaron y recombinaron en una fuente. Con tal instrumento hemos demostrado que la aceleración de la gravedad puede medirse con una resolución mínima de tres partes en cien millones y esperamos centuplicar ese refinamiento. Hasta entonces, los efectos de la gravedad sobre un átomo se habían medido en una razón de una parte en cien.

A lo largo de los últimos años, el trabajo sobre atrapamiento de átomos ha despertado el interés por la manipulación de otras partículas neutras. Podemos aplicar los principios básicos del confinamiento atómico a partículas del tamaño de la micra, bolitas de polistireno por ejemplo. El intenso campo eléctrico en el centro de un haz láser focalizado polariza la partícula, de la misma manera que polarizaría un átomo. La partícula, como el átomo, absorberá también luz de determinadas frecuencias. El cristal, por ejemplo, absorbe fuertemente la radiación ultravioleta. Pero en cuanto la luz se sintonice por debajo de la frecuencia de absorción, la partícula se encaminará hacia la región de máxima intensidad del láser.

En 1986 Ashkin, Bjorkholm, J. B. Dziedzic y yo demostramos que las partículas de tamaños comprendidos entre 0,02 y 10 micras podían quedar atrapadas en un haz láser focalizado. En 1970, y entre dos haces de luz focalizados que se propagaban en direcciones opuestas, Ashkin confinó esferas de látex, de una micra de tamaño, suspendidas en agua. Transcurrió mucho tiempo antes de observarse que, si se focaliza bien un haz, bastaría la fuerza dipolar para superar la fuerza de colisión que empuja la partícula en la dirección en la que viaja el haz de láser.

La ventaja enorme que reporta el empleo de un solo haz estriba en la posibilidad de manejarlo a modo de pinzas ópticas para tratar con partículas pequeñas. Las pinzas ópticas se integran fácilmente en un microscopio convencional, introduciendo la luz láser en el tubo y focalizándola con el objetivo. Podemos estudiar la muestra colocada en la platina del microscopio y manipularla al propio tiempo moviendo el haz de láser focalizado.

Los biólogos se han prendado de cierta aplicación de las pinzas ópticas, descubierta por Dziedzic y Ashkin. Las pinzas, comprobaron, podían asir bacterias vivas y otros organismos sin causarles ningún daño, que se viera. La capacidad de atrapar organismos vivos sin lesionarlos resulta sorprendente, si tenemos en cuenta que la intensidad láser típica en el punto de focalización de las pinzas ópticas es de unos 10 millones de watts por centímetro cuadrado. Resulta que mientras el organismo sea casi transparente a la frecuencia de la luz atrapante, puede enfriarse bien con el agua que lo rodea. Obviamente, si la intensidad láser es demasiado elevada, podríamos segar "ópticamente" la criatura.

Se han encontrado muchas aplicaciones a las pinzas ópticas. Ashkin demostró que con ellas se manipulaban orgánulos del interior celular sin perforar la membrana citoplasmática. Steven M. Block y sus colaboradores, del Instituto Rowland de Cambridge y la Universidad de Harvard, han estudiado las propiedades mecánicas de los flagelos bacterianos. El equipo de Michael W. Berns, de la Universidad de California en Irvine, ha trabajado con cromosomas en el interior del núcleo celular.

Las pinzas ópticas permiten acercarnos a sistemas biológicos aún más pequeños. Robert Simmons, Jeff Finer, James A. Spudich y el autor las están aplicando al estudio molecular de la contracción muscular. En ese campo laboran también Block y Michael P. Sheetz, de la Universidad de Duke. Nos proponemos, entre otros objetivos, medir la fuerza generada por una molécula de miosina que arrastra un filamento de actina. Abordamos ese "motor molecular" uniendo una esfera de polistireno a un filamento de actina y utilizando las pinzas ópticas para sujetar la bola. Cuando la cabeza de la miosina incide sobre el filamento de actina, el movimiento es captado por un fotodiodo en el ocular del microscopio. Un circuito de retroacción gobierna las pinzas y le insta a tirar de la miosina a fin de compensar cualquier movimiento. Así hemos medido la intensidad del arrastre de la miosina sometida a tensión.

En una escala aún menor, Spudich, Steve Kron, Elizabeth Sunderman, Steve Quake y yo trabajamos en la manipulación de una molécula de ADN: colocamos esferas de polistireno en los extremos de una cadena de ADN y sujetamos las esferas con dos pinzas ópticas. Para observar la molécula cuando tiramos de ella, teñimos el ADN e iluminamos la tinción con luz verde de un láser de argón; detectamos la fluorescencia

con una cámara de vídeo sensible. En nuestros primeros experimentos medimos las propiedades elásticas del ADN. Los dos extremos se separaron hasta que la molécula quedó estirada cuan larga era, y entonces se soltó uno de los extremos. El estudio de la recuperación de la morfología original de la molécula facilita la comprobación de teorías básicas de la física de polímeros lejos del estado de equilibrio.

Las pinzas cumplen también un servicio en la preparación de otros experimentos. Sujetando las bolas en la platina del microscopio y aumentando la potencia del láser, descubrimos que la bola podía "soldarse en el punto" sobre la platina, dejando el ADN desplegado y en tensión. Técnica ésta que podría aprovecharse para preparar largas cadenas de ADN que hubieran de examinarse con los microscopios más adecuados. Confiamos, por último, en extender las aplicaciones a la investigación del movimiento de enzimas por el ADN y abordar cuestiones relacionadas con la expresión y la reparación de los genes.

Tan sólo han transcurrido seis años desde que se consiguió confinar los átomos en melazas ópticas y se construyeran las primeras trampas atómicas. Las trampas ópticas nos han permitido "ver y palpar" partículas de forma desconocida e interesante. Hemos demostrado que, si podemos "ver" un átomo o una partícula microscópica, podremos ser capaces de asirla sin alterar las membranas interpuestas. Ha sido un placer personal ver cómo conjeturas esotéricas de la física atómica han fructificado: las técnicas y aplicaciones de enfriamiento y confinamiento por láser han superado nuestros sueños de los primeros días. Tenemos ahora nuevos instrumentos para la física, la química y la biología.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LASER SPECTROSCOPY OF TRAPPED ATOMIC IONS. Wayne M. Itano, J. C. Berqwuist y D. J. Wineland en *Science*, vol. 237, págs. 612-617; 7 de agosto de 1987.

COOLING, STOPPING, AND TRAPPING ATOMS. William D. Phillips, Phillip L. Gould y Paul D. Lett en *Science*, vol. 239, págs. 877-883; 19 de febrero de 1988.

NEW MECHANISMS FOR LASER COOLING. N. C. Cohen-Tannoudji y W. D. Phillips en *Physics Today*, vol. 43, n.º 10, págs. 33-40; octubre de 1990.

LASER MANIPULATION OF ATOMS AND PARTICLES. Steven Chu en *Science*, vol. 253, págs. 861-866; 23 de agosto de 1991.

Así comienza la mitosis

Todas las células eucariotas poseen un reloj molecular que determina cuándo deben dividirse. El componente fundamental de la maquinaria de este reloj es el producto del gen cdc2

Sergio Moreno

Diez billones de células (10^{13}) componen nuestro cuerpo. Se han generado por división reiterada y sucesiva, a partir de una sola originaria: el cigoto. La división celular no se detiene al llegar al estado adulto. Las células de la mayoría de nuestros tejidos, con la notable excepción de las neuronas, continúan dividiéndose para compensar las pérdidas que se producen por muerte celular. Cada segundo, se originan millones de células nuevas en la piel, la mucosa digestiva o la médula ósea.

Antes de proceder a dividirse, la célula tiene que crecer y doblar su contenido, incluido su número de cromosomas, para luego segregarlos (distribuirlos) entre las dos células hijas. El ciclo celular es el conjunto de reacciones que se desarrollan en ese proceso. Consta de cuatro fases: la fase *S* de síntesis de ADN, en la cual los cromosomas se duplican; la fase *M*, de mitosis, en la que los cromosomas duplicados se confinan hacia polos opuestos de la célula, y las fases G_1 y G_2, de "gap" (intervalo), en las que las células preparan la maquinaria bioquímica necesaria para el inicio de la síntesis de ADN (fase *S*) o de la mitosis (fase *M*). Al final de la fase *M*, la célula se divide en dos mediante el proceso de citocinesis.

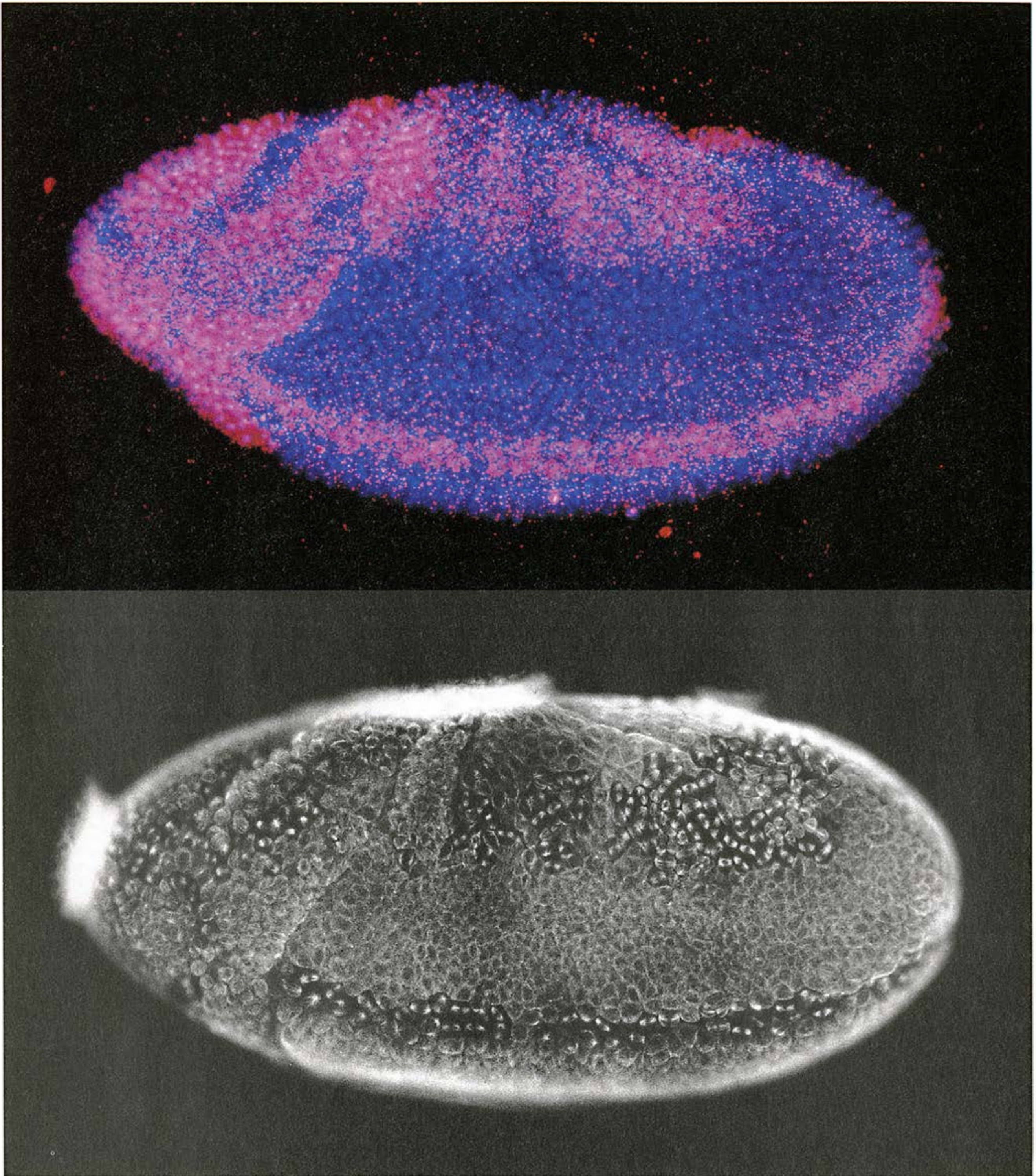
Si bien la naturaleza bioquímica y citológica de la replicación del ADN y la mitosis se conocen bastante bien desde hace tiempo, sólo en los últimos cuatro años, y gracias a la convergencia de varias áreas de investigación, se ha empezado a desentrañar el control de la iniciación de estos procesos. En la primera parte del artículo abordaremos el descubrimiento de las moléculas responsables de la iniciación de la mitosis; luego, consideraremos brevemente qué moléculas similares podrían intervenir en el comienzo de la replicación del ADN.

El inicio de la mitosis se caracteriza por una reorganización de la arquitectura de la célula. Los principales cambios citológicos son la ruptura de la envoltura nuclear, la condensación de los cromosomas y la formación de un huso mitótico que servirá para arrastrar las cromátidas de cada cromosoma hacia polos opuestos de la célula. (Cromátida es la mitad longitudinal de un cromosoma que resulta de la duplicación de éste.) Durante las dos últimas décadas se ha investigado la bioquímica y la genética de las moléculas responsables del comienzo de la mitosis. En uno de los enfoques bioquímicos se aislaron los factores que promueven la entrada en mitosis de una célula que se halla en la fase G_2.

A principios de los años setenta, Yoshio Masui y Clement Markert, entonces en la Universidad de Yale, descubrieron que, cuando el citoplasma de una célula en proceso de mitosis se microinyectaba en otra que se encontraba en la fase G_2, esta última entraba en mitosis. Tan sencillo experimento les permitió deducir que el citoplasma de la célula mitótica debía contener un factor responsable de promover la entrada en mitosis. Lo denominaron factor promotor de la mitosis o FPM. Posteriormente, se detectó una actividad similar en células de mamíferos, pollo, levaduras, etcétera. Durante cada ciclo celular, esta actividad oscila periódicamente, siendo máxima durante la mitosis y baja en las otras fases. A causa de su inestabilidad, se tardó en purificar y caracterizar el FPM. Además, el único ensayo disponible (la microinyección de ovocitos inmaduros de *Xenopus*) era muy laborioso; por eso, durante muchos años el FPM fue sólo un "factor citoplasmático" más, entre varios miles de proteínas. A mediados de los años ochenta se produjo un avance muy importante cuando Fred Lohka, del laboratorio de Masui, ahora en la Universidad de Toronto, desarrolló un extracto libre de células que permitía ensayar pequeñas cantidades del FPM y simplificaba drásticamente la purificación. Con ese mismo protocolo, Lohka, Marianne Hayes y Jim Maller, de la Universidad de Colorado en Denver, purificaron el FPM mediante técnicas bioquímicas convencionales para el caso de las proteínas. El factor constaba de dos proteínas, una de 34 y otra de 45 kilodaltons.

Harry Mathews, Robert Inglish y Morton Bradbury, de la Universidad Politécnica de Portsmouth, tomaron otro camino. Investigaban el empaquetamiento tridimensional del ADN en el núcleo, interesados sobre todo por el mecanismo en virtud del cual los cromosomas se condensan durante la mitosis. Se sabía que, junto con otras histonas, la H1 era una proteína implicada en dicho empaquetamiento; esta proteína se fosforila bruscamente al inicio de la mitosis, fosforilación a la que, durante mucho tiempo, se le atribuyó un papel en la condensación de los cromosomas. Bradbury y colaboradores descubrieron que la actividad enzimática de una proteína quinasa que fosforilaba la histona H1 aumentaba también durante la mitosis. Hubo más. La adición de fracciones semipurificadas de esta proteína quinasa a células en G_2

SERGIO MORENO trabaja en el departamento de bioquímica de la Universidad de Oxford. Se doctoró en la Universidad de Salamanca. Desde 1986 se halla asociado a Paul Nurse en el estudio de la regulación del ciclo celular, primero en la Fundación Imperial para la Investigación del Cáncer en Londres y más tarde en el departamento de bioquímica de la Universidad de Oxford. Su interés se ha centrado, sobre todo, en el proceso de inicio de la mitosis.



1. **EN LOS EMBRIONES** de la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*, las 13 primeras divisiones nucleares son rapidísimas. Los núcleos se dividen sincrónicamente y pasan de la fase *S* a la *M*, con ausencia de fases G_1 y G_2. Generan un sincitio de unos 5000 núcleos. Al final de la mitosis 13, se inicia un proceso de celularización, en el que cada núcleo se rodea de una membrana y se origina una monocapa de células en la superficie del embrión. Estas células entran sincrónicamente en la fase *S* del ciclo 14; a partir de aquí, la fase G_2 de los siguientes ciclos celulares dura distintos períodos de tiempo según la localización de la célula en el embrión. Bruce Edgar y Patrick O'Farrell, de la Universidad de California en San Francisco, encontraron que *string* (*stg*), un gen homólogo al gen *cdc25* de *S. pombe*, era necesario para que las células de los embriones de *Drosophila* entraran en la mitosis del ciclo 14. La razón por la que los embriones deficientes en *stg/cdc25* dejan de dividirse sólo después de 13 ciclos estriba en que, durante las 13 primeras divisiones, los núcleos comparten un mismo citoplasma, rico en proteína materna. Al ser la madre heterocigótica (una copia del gen es normal y la otra está alterada), la mitad de las moléculas de esta proteína son funcionales y el embrión puede dividirse. Ahora bien, al final de la mitosis 13, coincidiendo con la celularización, el ARNm de *stg/cdc25* se destruye; las células del embrión (homocigóticas) deben sintetizar su propia proteína a partir de sus propios genes, que, al no ser funcionales, determinan el bloqueo de los embriones en G_2. En embriones normales de *Drosophila*, a partir de la mitosis 14 el patrón de síntesis del ARNm de *stg/cdc25* determina el momento en que las células entran en mitosis. En la figura se muestra un embrión de *Drosophila* en G_2 del ciclo 14 (*arriba*); los núcleos aparecen en azul y, en rojo, las células que expresan el ARNm de *stg/cdc25*. Abajo se muestra un embrión unos diez minutos mayor, en el que se observa que el patrón de células en mitosis (ver husos mitóticos) se corresponde con el patrón de expresión de *stg/cdc25*. [Estas fotografías aparecieron en la portada de *Cell*, vol. 57, n.º 1 (Cell Press copyright) y fueron obtenidas y cedidas por Bruce Edgar.]

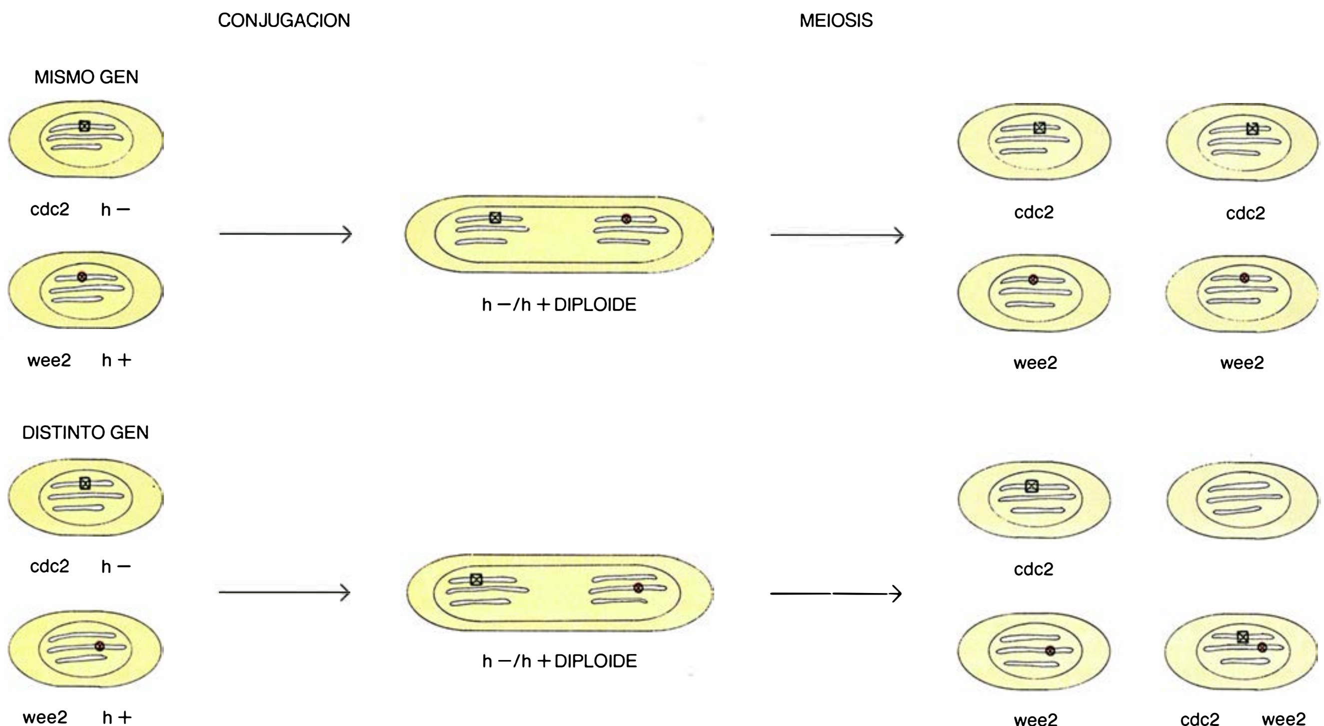
del hongo *Physarum polycephalum* las inducía a entrar prematuramente en mitosis, señal de que las fracciones en cuestión desarrollaban una actividad similar a la del FPM. Recientemente, varios grupos de investigación han purificado esta histona H1 quinasa y han demostrado que consta de dos proteínas, una de 34 y otra de 62 kilodaltons.

Lee Hartwell, de la Universidad de Washington en Seattle, y Paul Nurse, entonces en la de Edimburgo, partieron de la genética en su estudio del ciclo celular. Hartwell había propuesto que el ciclo comprendería una serie de reacciones sucesivas, en las que el inicio de cada reacción dependía de la terminación de la anterior, a modo de una cadena de producción de automóviles, en la que el montaje de cada pieza se halla supeditado a la colocación de la anterior. Cada una de estas reacciones dependía de una proteína (operario) determinada por un gen. Si se pudiera alterar (mutar) un determinado gen e inactivar específicamente una de estas proteínas, las células se pararían en el punto del ciclo celular donde se requiriese la proteína. Por ejemplo, los mutantes deficientes en ADN polimerasa, la enzima que cataliza la duplicación del ADN, se pararían en la fase *S*, mientras que los mutantes privados de tubulinas, componentes principales del huso mitótico, se detendrían en la mitosis antes de la segregación de los cromosomas. Si, además, se dispusiera de un método para identificar cada uno de estos genes y aislarlos (clonación), conoceríamos la función de las proteínas para las que codifican y estableceríamos las interacciones entre ellas. Se resolvería así el rompecabezas del ciclo celular. Ese marco de posibilidades, perteneciente al reino de lo utópico en la década de los setenta, se ha hecho realidad gracias al reciente desarrollo de técnicas de genética molecular que han permitido unir la genética clásica (mutantes) con la bioquímica (función).

Podemos alterar los genes de un organismo mediante agentes físicos o químicos; ejemplos de los primeros son la luz ultravioleta o los rayos X y, de los segundos, la nitrosoguanidina y el etilmetanosulfonato, que introducen sustituciones al azar de una de las cuatro bases (A, T, C y G) del ADN por otra. Algunas de estas sustituciones suponen un cambio de un aminoácido por otro durante la síntesis de proteínas en el ribosoma. Esas mutaciones inducidas pueden bastar para modificar ligeramente la estructura terciaria de la proteína e inactivarla en ciertas condiciones, de temperatura por ejemplo. Si la proteína mutante es activa a baja temperatura (25 °C) e inactiva a alta temperatura (35 °C), se dice que el mutante es termosensible; esos dos valores —25 y 35 grados— constituyen entonces la temperatura permisiva y la restrictiva, respectivamente.

Pero este enfoque presenta un problema: las células de la inmensa mayoría de los organismos eucariotas son diploides, es decir, contienen dos copias de cada cromosoma por célula y, por tanto, dos copias de cada gen. Retomando el símil de la producción en cadena, es como si hubiera dos operarios en cada eslabón: si maniatamos a uno de los dos, habría siempre otro para realizar el trabajo y no notaríamos el efecto. Hartwell y Nurse usaron sendas levaduras, *Saccharomyces cerevisiae* y *Schizosaccharomyces pombe*, por su carácter haploide, con una sola copia de cada cromosoma por célula y, por tanto, una sola copia de cada gen. Además, el ciclo celular de estos microorganismos es similar al de células eucariotas superiores con fases *S* y *M* perfectamente caracterizadas.

Comenzaron por aislar un grupo



2. LAS CELULAS HAPLOIDES de la levadura *Schizosaccharomyces pombe* poseen tres cromosomas. Esta levadura tiene dos sexos: h^- y h^+. Si ponemos en contacto células de sexo opuesto, se fusionan y forman un cigoto diploide. El cigoto puede dividirse mitóticamente como células diploides estables; ello permite determinar si una mutación es dominante o recesiva, según se manifieste o no el fenotipo en la cepa diploide. En ciertas condiciones, estas células diploides entran en meiosis, esporulan y se forman cuatro células haploides que cierran el ciclo. Para averiguar si dos mutaciones están en el mismo o en distinto gen se cruzan las dos cepas mutantes. Si las mutaciones concernieran a genes distintos, los genes formarían, durante la meiosis, combinaciones nuevas y una fracción de las células portaría el fenotipo silvestre. Ahora bien, si el gen es el mismo, no se producirán combinaciones distintas y la mitad de los productos meióticos poseerán el fenotipo de un mutante y la otra mitad el del otro. Tal fue la estrategia seguida para establecer que las cepas mutantes *cdc2* y *wee2* estaban afectadas en el mismo gen.

de mutantes termosensibles de estas levaduras que crecían y se dividían a 25 °C. Cuando se incubaban a 35 grados, dejaban de dividirse. Esos mutantes definían 40 genes diferentes en *S. cerevisiae* y unos 30 en *S. pombe*, que se llamaron genes del ciclo de división celular o genes *cdc*.

El siguiente paso consistía en hallar cuáles de estos genes *cdc* controlaban la división celular. Entre todos los mutantes, la cepa *cdc2* de *S. pombe* destacaba porque, a la temperatura restrictiva, se bloqueaba en dos puntos del ciclo celular, primero en G_1 antes del inicio de la fase *S* y luego en G_2 antes del inicio de la mitosis. Por tanto, la proteína codificada por el gen *cdc2* era necesaria para que ambos procesos tuvieran lugar.

Sin embargo, un descubrimiento accidental dotó de mayor interés a ese gen. Durante el proceso de aislamiento de los mutantes *cdc* en *S. pombe*, Paul Nurse recurría a la centrifugación en gradiente de sacarosa, tras la inducción de la mutagénesis, para enriquecer las cepas de levaduras *cdc*; éstas, de fenotipo alargado, se alojaban en zonas más densas del gradiente. Examinó al microscopio el gradiente y observó que, en las zonas menos densas, había células más pequeñas que las de la cepa silvestre (no mutante). Cuando esas células se cultivaban en un medio idóneo, se dividían, con aproximadamente la mitad del tamaño de las células de la cepa silvestre. Esto se debía a que permanecían menos tiempo en la fase G_2 del ciclo celular y adelantaban el comienzo de la mitosis. A este segundo tipo de mutantes los denominó *wee*, ya que se aislaron en Edimburgo (*wee*, significa pequeño en escocés); comprendían dos genes: *wee1* y *wee2*.

Cuando se cruzaron los mutantes *wee* con los mutantes *cdc*, se observó que la cepa *wee2* y la cepa *cdc2* estaban afectadas en el mismo gen. Este resultado es comparable al descubrimiento del FPM, pues indicaba que el producto del gen *cdc2*, además de intervenir en dos puntos del ciclo celular, catalizaba en G_2 una reacción que constituía la etapa limitante para la entrada en mitosis.

El trabajo con levaduras ofrece otra ventaja. Una vez aislado un mutante bien caracterizado, podemos clonar (aislar) el gen silvestre por el procedimiento de complementación, que consiste en preparar una genoteca de ADN de la cepa silvestre (una colección de fragmentos pequeños de ADN donde están representados todos los genes del organismo) e introducirla en la cepa mutante. Las células que reciban el fragmento de ADN portador del gen silvestre se dividirán en condiciones restrictivas, ya que el gen silvestre es capaz de aportar la función defectiva en el mutante y, por tanto, "complementar" el defecto de la mutación.

Para preparar una genoteca, se purifica el ADN de la cepa silvestre y se le fragmenta en cortos segmentos mediante enzimas de restricción. Los segmentos se insertan en un plásmido, una molécula de ADN circular. El ADN de la levadura consta de unos 15 millones de pares de bases (cuatro veces el tamaño del ADN de *Escherichia coli*); el genoma entero estaría, pues, representado, aproximadamente, en 3000 plásmidos con fragmentos de 5000 pares de bases (el tamaño medio de un gen de levadura es de 2000 pares de bases). Cuando a una cepa mutante *cdc* se le introduce esta genoteca, una de cada 3000 células recibirá un plásmido que incluirá el gen silvestre; esta célula podrá crecer a la temperatura restrictiva y formar una colonia. Si se extrae el ADN de esta colonia, el plásmido se podrá aislar en la bacteria *Escherichia coli*, gracias a que estos plásmidos llevan, además, un gen marcador que permite el crecimiento de la bacteria en presencia de ciertos antibióticos, como, por ejemplo, la ampicilina. Una vez aislado en la bacteria, se purifica el plásmido y se determina la secuencia de bases del gen que contiene. Conocida esta secuencia, se inferirá la cadena de aminoácidos de la proteína codificada. (Cada triplete de bases del ADN representa un aminoácido en la proteína.) Así se clonó el gen *cdc2* de *S. pombe* y se descubrió que determinaba una proteína de 298 aminoácidos con un peso molecular de 34 kilodaltons. Cuando se comparó la secuencia de aminoácidos de la proteína cdc2 con la de otras proteínas, conocidas, salió a la luz su homología con una clase de proteínas dotada de actividad proteína quinasa de serina y treonina. Estas proteínas catalizan la transferencia de un grupo fosfato desde una molécula de ATP hacia un residuo de serina o treonina en otra proteína.

Para demostrar que la proteína cdc2 era en realidad una proteína quinasa, Viesturs Simanis, en nuestro laboratorio de la Universidad de Oxford que dirige Nurse, sintetizó varios péptidos correspondientes a diferentes regiones de la proteína. Los usó para inmunizar conejos y preparar anticuerpos. Cuando los anticuerpos se mezclaban con extractos de células de levaduras se inmunoprecipitaba una proteína con el peso molecular esperado de 34 kilodaltons. Además, esta proteína tenía actividad proteína quinasa *in vitro*.

A principios de los ochenta, David Beach, Barbara Durkacz y Paul Nurse, entonces en la Universidad de Sussex, encontraron que el gen *CDC28* de *Saccharomyces cerevisiae* era un homólogo funcional del gen *cdc2*, ya que permitía el crecimiento a alta temperatura de mutantes termosensibles de *cdc2*. *CDC28* había sido clonado por Steve Reed, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y, al igual que *cdc2*, determinaba una proteína quinasa de 34 kilodaltons. La homología entre los productos de estos dos genes, expresada como porcentaje de aminoácidos idénticos que ocupan la misma posición en la proteína, era del 63 por ciento. Si se tiene en cuenta que estas dos levaduras iniciaron cursos evolutivos divergentes hace más de mil quinientos millones de años, por la misma fecha en que divergieron todas las células eucariotas, el hecho de persistir la proteína cdc2 en tan buena medida entre estas levaduras abogaba por la conservación del gen *cdc2* durante la evolución.

Así las cosas, en 1987, Melanie Lee, en nuestro laboratorio, y Giulio Draetta y Leo Brizuela, en el de David Beach en Cold Spring Harbor, iniciaron la búsqueda de homólogos de *cdc2* en organismos eucariotas superiores. El experimento que Melanie Lee realizó fue tan sencillo cuan innovador. Hasta el momento, muchos grupos habían clonado genes de levaduras por complementación usando genotecas de levaduras; pero, ¿podrían clonarse genes de otros organismos en levaduras si se empleaba la genoteca apropiada? Lee recurrió a la genoteca de ADN complementario humano (ADN complementario obtenido a partir de ARN mensajero); clonó un gen que complementaba un mutante termosensible de *cdc2*. El gen, que se llamó *CDC2Hs* (de *Homo sapiens*), es tan similar a los genes *cdc2* y *CDC28* como lo son *cdc2* y *CDC28* entre sí; además, *CDC2Hs* es capaz de llevar a cabo todas las funciones de *cdc2* o *CDC28* en los respectivos organismos, cuando el gen *CDC2Hs* sustituye a *cdc2* o *CDC28*.

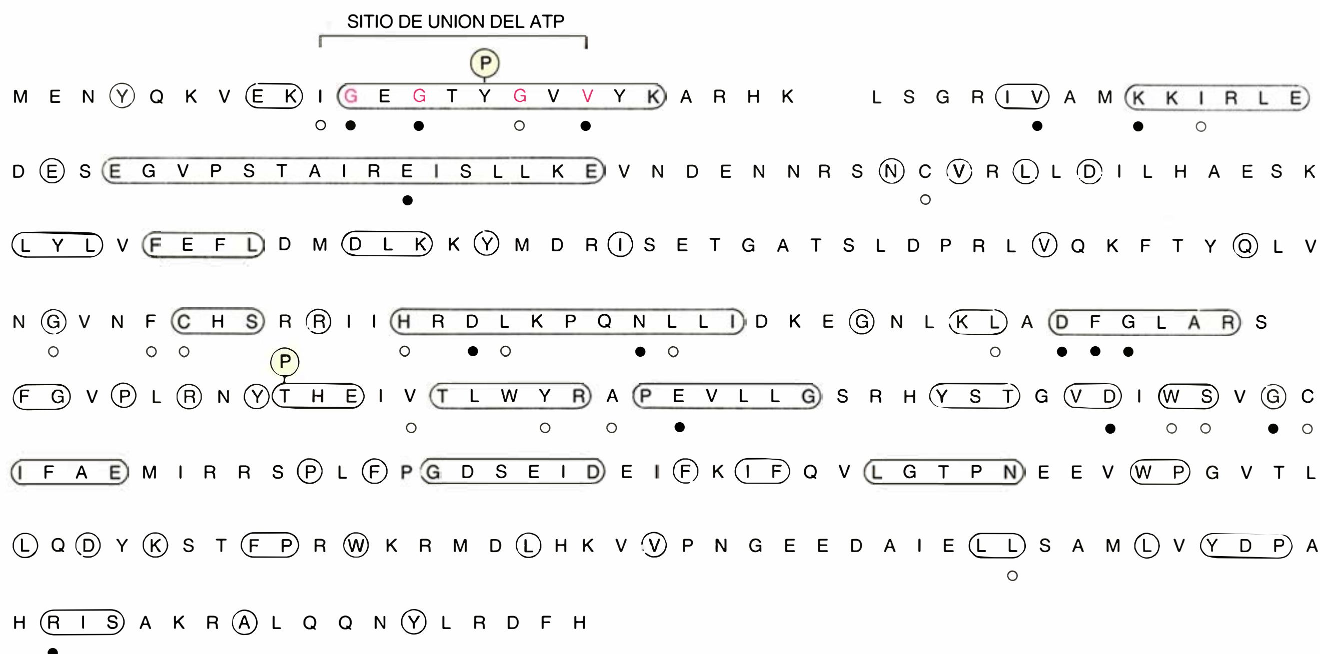
Recientemente, Juan Jiménez, también en nuestro laboratorio y ahora en la Universidad de Málaga, ha aislado homólogos funcionales a *cdc2* y otros genes *cdc* de *Drosophila melanogaster*, mediante un método similar. Giulio Draetta y Leo Brizuela, por su lado, descubrieron que anticuerpos contra la proteína cdc2 re-

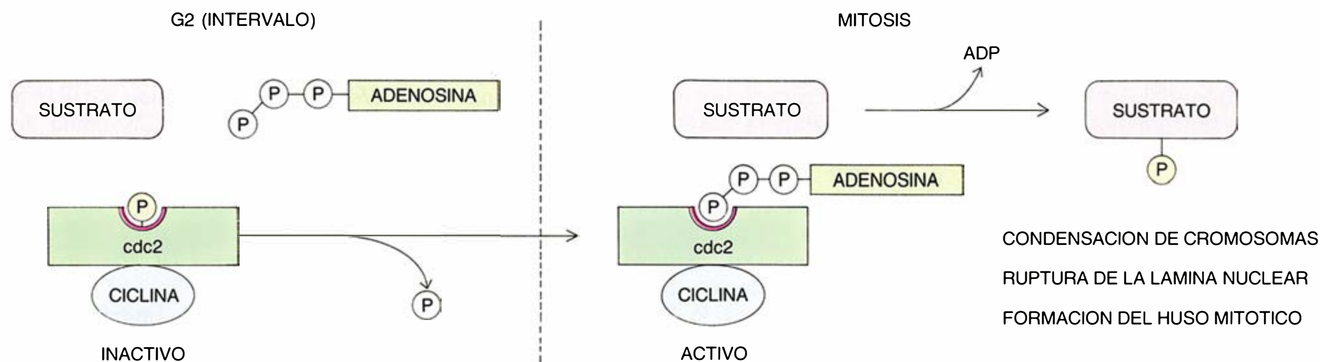
conocían una proteína de 34 kilodaltons en extractos de células humanas. Desde entonces, en todos los organismos eucariotas analizados hasta el momento, tanto en animales como en plantas, se ha encontrado una proteína equivalente a cdc2, prueba inequívoca de la presencia generalizada de esta proteína en todas las células eucariotas.

¿Cuál es el mecanismo que regula la función de cdc2 en la célula? Giulio Draetta, en células de mamíferos, y yo mismo, en células de levaduras, hallamos que la actividad proteína quinasa de cdc2 oscilaba periódicamente a lo largo del ciclo celular; su pico máximo correspondía al inicio de cada mitosis. Este resultado explicaba el papel de la proteína cdc2 en el inicio de la mitosis. Comenzó a especularse sobre la posible relación entre cdc2, FPM y la histona H1 quinasa.

A principios de 1988, Chris Norbury, de nuestro laboratorio, se dio cuenta de la similitud en tamaño molecular entre la proteína cdc2 y el componente de menor tamaño molecular del FPM. En colaboración con Jean Gautier y Fred Lohka, del laboratorio de Jim Maller en Denver, Norbury observó que ciertos anticuerpos obtenidos contra regiones de aminoácidos, que persistían a lo largo de la evolución, entre las proteínas homólogas de cdc2 reconocían de manera específica el componente de 34 kilodaltons presente en el FPM purificado. En un experimento similar, Melanie Lee en colaboración con Jean-Claude Labbé, del laboratorio de Marcel Dorée en Montpellier, demostró que cdc2 era también el componente de menor peso molecular de la histona H1 quinasa purificada a partir de huevos sin fecundar de estrella de mar. Leo Brizuela, en colaboración por un lado con Bill Dunphy en el laboratorio de John Newport en la Universidad de California en San Diego y por otro con Dominique Arion en el laboratorio de Laurent Meijer en Roscoff, llegaron a conclusiones similares. Fue uno de esos momentos mágicos en biología, cuando líneas de investigación que durante muchos años se han mantenido independientes convergen en el descubrimiento de las mismas moléculas proteicas: cdc2, FPM e histona H1 quinasa.

¿Cuál era el otro componente del FPM o de la histona H1 quinasa? A principios de los ochenta, Tim Hunt,





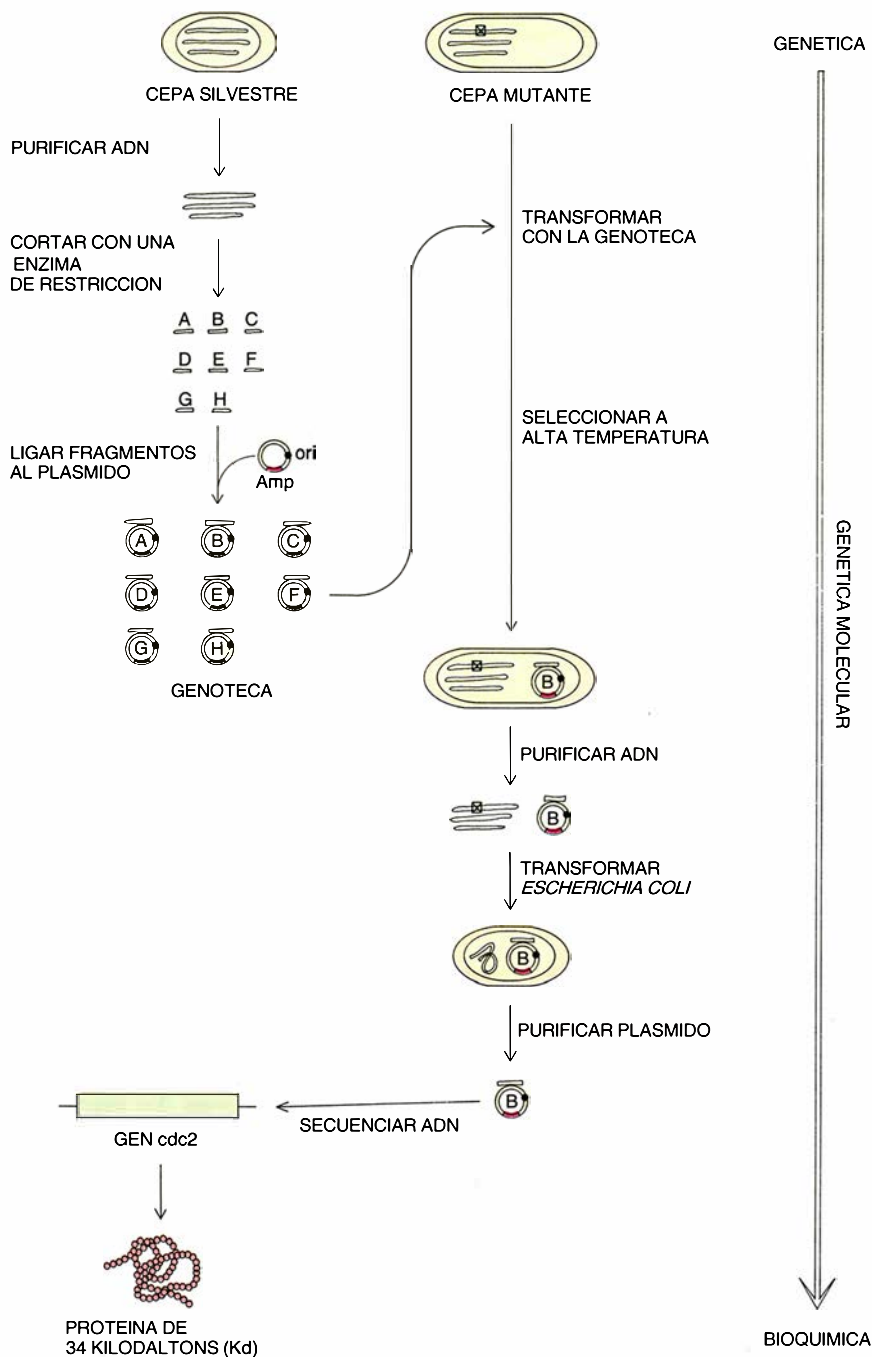
3. EL GEN *cdc2* determina una proteína de 34 kilodaltons, cuya presencia es requerida, por dos veces, a lo largo del ciclo celular: primero, antes de la duplicación del ADN; luego, para el comienzo de la mitosis. Esta proteína la encontramos en las células de todos los organismos eucariotas. El porcentaje de identidad de aminoácidos entre las proteínas homólogas a cdc2 supera el 60 %. Todos estos homólogos de cdc2 guardan homología, a su vez, con las proteínas quinasas, unas enzimas que catalizan la reacción de transferencia de fosfato desde una molécula de ATP a una proteína. La actividad enzimática de cdc2 está regulada por fosforilación del aminoácido tirosina (*Tyr*[15]), localizado en el sitio de unión del ATP. Se supone que, cuando esta tirosina está fosforilada, la molécula de fosfato impide la unión del ATP a ese sitio y la proteína es inactiva. Al inicio de la mitosis, la fosfatasa de tirosina codificada por el gen *cdc25* elimina este grupo fosfato, facilitando el acceso del ATP y la activación de la quinasa cdc2.

de la Universidad de Cambridge, trabajando en embriones de almejas, descubrió unas proteínas que se acumulaban durante el ciclo celular y se destruían al final de cada mitosis. Las llamó ciclinas. Desde entonces, se ha confirmado la presencia de esas proteínas en *Xenopus*, *Drosophila*, humanos, levaduras (el producto del gen *cdc13*) y otros organismos. Gozan también de distribución universal. Varios grupos de investigación han demostrado que una molécula de ciclina se asocia a otra molécula de proteína cdc2 para formar un dímero. El peso molecular de las ciclinas oscila entre los 45 kilodaltons de la ciclina de *Xenopus* y los 62 kilodaltons de la ciclina humana. Por tanto, los dos componentes purificados del FPM eran el producto del gen *cdc2* (34 kilodaltons) y la ciclina (45 kilodaltons). La activación de este complejo al final de la fase G_2 es la responsable de promover la iniciación de la mitosis mediante la fosforilación de una serie de sustratos.

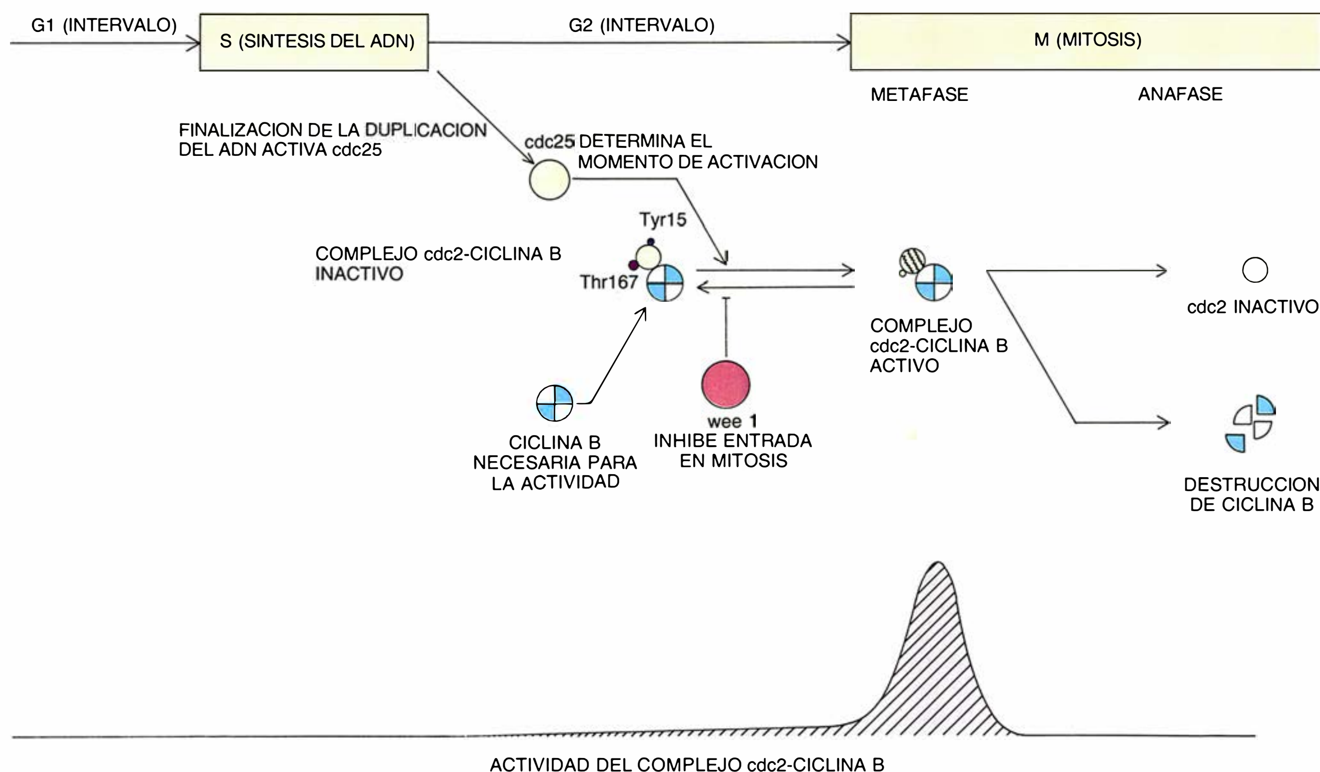
¿Cómo se regula la actividad del complejo cdc2/ciclina? Andrew Murray, del laboratorio de Marc Kirschner en la Universidad de California en San Francisco, descubrió que la síntesis de ciclina era necesaria en cada ciclo celular para iniciar la mitosis. En colaboración con Jackie Hayles, de nuestro departamento, vimos que, si bien se requería la asociación de la proteína cdc2 y ciclina en *S. pombe* para la actividad del complejo, éste, aunque formado, se hallaba inactivo en mutantes que se bloqueaban en G_2 antes de entrar en mitosis. Por tanto, el mecanismo de activación debía diferir de la mera formación del complejo.

La respuesta sobre la regulación de la actividad del complejo se obtuvo cuando se analizaron las modificaciones post-traducionales que sufre la proteína cdc2 durante el ciclo celular. Una vez sintetizadas en los ribosomas, las proteínas se hallan expuestas a fosforilación, glicosilación, miristilación y otras modificaciones. Algunas de éstas redundan en la actividad biológica, activándola o inhibiéndola, así como en la localización subcelular de la proteína. La fosforilación de proteínas se produce en los tres aminoácidos que contienen grupos hidroxilo: serina, treonina y tirosina. Viesturs Simanis había observado que, cuando las células de levaduras se marcaban radiactivamente con fosfato portador de fósforo-32 e inmunoprecipitaba con anticuerpos contra cdc2, se detectaba una fosfoproteína de 34 kilodaltons.

Giulio Draetta, en un experimento similar, observó que la proteína humana también era una fosfoproteína, que contenía fosfotreonina y fosfotirosina. Yo había observado que las células de levaduras que presentaban una mutación en el gen *cdc25* se bloqueaban, a la temperatura restrictiva, al final del período G_2 del ciclo celular con baja actividad proteína quinasa, asociada a cdc2; si estas células se pasaban a la temperatura permisiva entraban sincrónicamente en mitosis y a los 10 minutos se activaba la proteína quinasa cdc2, al-



4. LAS CEPAS MUTANTES *cdc* son termosensibles y se dividen a la temperatura permisiva (25 °C), pero no a la temperatura restrictiva (35 °C). Los genes alterados en estas cepas mutantes se pueden clonar por un procedimiento de complementación, que consiste en introducir en la cepa mutante una colección de plásmidos portadores de genes del microorganismo del que se quiere clonar el gen. Los plásmidos se replican y se mantienen independientes del resto del ADN durante cada división celular. Cuando un plásmido posee la copia silvestre del gen mutado y entra en una célula mutante, el gen silvestre producirá proteína funcional y será capaz de paliar el defecto de la proteína mutante, proteína que permitirá la división de esta célula a la temperatura restrictiva. Ese plásmido puede aislarse y purificarse en la bacteria *Escherichia coli*. Una vez purificado, se determina la secuencia de bases del gen que porta y, con ésta, la secuencia de aminoácidos de la proteína codificada por el gen. Siguiendo esa pauta experimental se han clonado, secuenciado e identificado los productos de muchos genes importantes para la división celular de células eucariotas superiores.



5. LA CICLINA B se sintetiza durante el ciclo celular y se asocia con la proteína cdc2 para formar el complejo cdc2/ciclina. Este complejo es inactivo, ya que cdc2 está fosforilada en el aminoácido tirosina (Tyr^{15}), localizado en el sitio de unión del ATP. En *G₂*, cuando las células han acabado la duplicación del ADN se genera una señal que activa la síntesis del ARNm de *cdc25* y, a su vez, de la proteína cdc25. Cuando la concentración de la enzima cdc25 alcanza cierto nivel en la célula, cataliza la desfosforilación de la proteína cdc2 en tirosina y se activa el complejo cdc2/ciclina. Este complejo fosforila varios sustratos: histona H1, lamina B, nucleolina, p60^{src}, vimentina, etcétera, que promueven la iniciación de la mitosis. En anafase, la destrucción de la ciclina y, probablemente, la desfosforilación de cdc2 en Thr^{167} causan la inactivación del complejo. Al final de la mitosis, una serie de fosfatasas de proteínas desfosforilan los sustratos de cdc2 y las dos células hijas vuelven a un estado de interfase.

canzando un máximo a los 20 minutos, con las células en metafase. Cuando Kathy Gould midió en nuestro laboratorio los cambios en el nivel de fosforilación de cdc2 en un experimento similar, observó que cdc2 se encontraba fosforilada en tirosina y treonina en las células que se hallaban bloqueadas en la fase G_2 con baja actividad proteína quinasa; sin embargo, a los 20 minutos, cuando las células entraban en mitosis, la proteína cdc2 se desfosforilaba, principalmente en la tirosina. Por tanto, la desfosforilación de la tirosina coincidía con la activación de la proteína quinasa.

Los aminoácidos que estaban fosforilados en la proteína eran la tirosina en la posición 15 (Tyr^{15}) y la treonina en la posición 167 (Thr^{167}). Curiosamente, la Tyr^{15} se aloja en una región conservada en todas las proteínas quinasas, segmento que es, además, responsable de la unión del ATP en la reacción de transferencia del fosfato.

Con ese dato, se pensó en el siguiente mecanismo para la regulación de la actividad enzimática de cdc2: cuando la proteína se encontrara fosforilada en la Tyr^{15}, el ATP no podría unirse y, por tanto, la proteína se mostraría inactiva. En cuanto el aminoácido Tyr^{15} se desfosforilase, quedaría libre el sitio de unión del ATP y se activaría la proteína.

Para comprobar la veracidad de ese modelo realizamos dos experimentos. En primer lugar, demostramos que el complejo cdc2/ciclina se activaba *in vitro* por tratamiento con una fosfatasa de tirosina purificada a partir de células humanas; por otro lado, Kathy Gould provocó *in vitro* la mutación de tirosina (Tyr^{15}) en cdc2 a fenilalanina (Phe^{15}), aminoácido éste idéntico a la tirosina menos en el grupo hidroxilo, del que carece, y no puede, en consecuencia, ser fosforilado. Esta versión mutante de la proteína cdc2 no se hallaría sujeta a la regulación por fosforilación en la tirosina. Por tanto, al estar el sitio de unión del ATP siempre libre, la proteína se activaría en cuanto se elevara la cantidad de ciclina en la célula. Cuando este gen mutante de *cdc2* se introdujo en células de levadura se obtuvo un fenotipo conocido como "catástrofe mitótica": las células entran en mitosis antes de completar la duplicación del ADN y mueren.

Dos proteínas regulan la actividad enzimática de cdc2. Son una proteína quinasa y una proteína fosfatasa de tirosina. Varios años antes de que se supiera que la actividad de cdc2 estaba regulada por fosforilación y desfosforilación de la Tyr^{15}, Paul Russell, de nuestro laboratorio, estableció, mediante experimentos genéticos, que la actividad de cdc2 estaba regulada por los productos de los genes *cdc25* y *wee1*. Había observado que, si aumentaba en las células la cantidad de proteína cdc25, éstas desarrollaban un fenotipo *wee*, prueba clara de que la proteína cdc25 desencadenaba el comienzo de la mitosis. Por contra, cuando se incrementaba la dosis de la proteína wee1, las células se dividían con un tamaño mayor que la cepa silvestre y, en consecuencia, el producto del gen *wee1* (la proteína) impedía el inicio de la mitosis. Con estos experimentos, Paul Russell logró adelantar y retrasar la entrada de una célula en mitosis, jugando con la dosis de cdc25 y wee1.

Estos resultados encajarían perfectamente en el modelo propuesto antes, si cdc25 fuera la fosfatasa de tirosina y wee1 la quinasa de tirosina. En efecto, hoy sabemos que cdc25 es la proteinfosfatasa que activa cdc2. En el caso de wee1, aunque el gen codifica una proteína con homología a proteínas quinasas aún no se ha probado que sea la proteína que fosforila a cdc2 en la tirosina-15.

En *Saccharomyces cerevisiae*, *Drosophila* y células humanas, se han clonado y secuenciado genes cuya estructura y función guardan homología con *cdc25*. Por lo que la función del gen *cdc25* parece encontrarse conservada a lo largo de la evolución. Bruce Edgar y Pat O'Farrell, de la Universidad de California en San Francisco, en *Drosophila* y yo en colaboración con Paul Russell, de la Clínica Scripps en San Diego, en *S. pombe* descubrimos que la cantidad de ARN mensajero y de proteína cdc25 se acumulaba durante la fase G_2 del ciclo celular y alcanzaba un máximo pocos minutos antes de iniciarse la mitosis.

¿Qué señal es la que cdc25 comunica al complejo cdc2/ciclina? La respuesta la extraeremos del trabajo realizado en nuestro laboratorio por Tamar Enoch. Durante la división celular se alternan las fases *S* y *M*. Si se bloquea la fase *S*, no comienza la mitosis; si se bloquea la mitosis, no acontece la siguiente fase *S*. Estas relaciones de dependencia aseguran, por una parte, que las células no inicien la mitosis antes de terminar la duplicación del ADN, y por otra, que los cromosomas no se dupliquen más de una vez; lo primero evita la muerte celular y lo segundo libra a las células de cromosomas supernumerarios.

Tamar Enoch halló que los mutantes que producían un exceso de la proteína cdc25 entraban en mitosis sin haber acabado la duplicación del ADN y morían. Este resultado indica que la proteína cdc25 le comunica a cdc2 que la duplicación de los cromosomas ha finalizado y pueden, por tanto, segregarse. Probablemente, al final de la fase *S* se envía una señal para activar la transcripción del gen *cdc25*. Cuando aumenta la concentración de proteína cdc25, se promueve la desfosforilación de la Tyr^{15} de la proteína cdc2 en el complejo formado por cdc2 y ciclina, se activa la proteína quinasa y se inicia la mitosis.

Pero, ¿cómo empieza la mitosis? Con la activación de la proteína cdc2 se suceden una serie de cambios característicos de la mitosis, que, en conjunto, permitirán que la célula segregue correctamente sus componentes celulares y asegure así la integridad funcional de sus dos células hijas. La caracterización de sustratos de la proteína cdc2 ha servido para conocer mejor los mecanismos moleculares que subyacen bajo todos estos cambios.

Como vimos anteriormente, Morton Bradbury y colaboradores encontraron, hace más de 15 años, que la histona H1 se fosforilaba al inicio de la mitosis. A propósito de esa proteína, Thomas Langan, de la Universidad de Colorado en Denver, halló que la histona H1 quinasa fosforilaba los restos de serina o treonina en la secuencia *S/T-P-X-K*, donde *S* es serina, *T* treonina, *P* prolina, *X* normalmente un aminoácido polar y *K* es lisina. Esta secuencia de aminoácidos se repite, varias veces, en los extremos amino y carboxilo de la histona H1. La fosforilación de estos sitios al inicio de la mitosis cambia, así se cree, la afinidad de la histona H1 por el ADN, lo que contribuye a la condensación del cromosoma.

La lamina *B* constituye otro de los sustratos que son fosforilados por la proteína quinasa cdc2. Las laminas son proteínas que forman un polímero en el interior de la membrana nuclear denominado "lámina nuclear", que es el responsable de mantener la morfología del núcleo. En cada ciclo celular, la lámina nuclear se disgrega durante la mitosis para facilitar la separación de los cromosomas y se vuelve a ensamblar al final de la mitosis. Matthias Peter, del laboratorio de Erich Nigg en el Instituto Suizo de Investigación del Cáncer en Basilea, observó que la histona H1 quinasa, purificada por Jean-Claude Labbé y Marcel Dorée, fosforilaba la lamina *B* en la serina localizada en la posición 16 (Ser^{16}) de la secuencia *S-P-T-R*, el mismo sitio en que se fosforila *in vivo* durante la mitosis en células de pollo.

La fosforilación de la lamina *B* en esta serina por la enzima cdc2, en el comienzo de la mitosis, desencadena la ruptura de la lámina nuclear. La fosforilación de otros sustratos, tales como $p60^{src}$, vimentina, nucleolinas y la subunidad mayor de la ARN polimerasa, por la enzima cdc2 en mitosis podría ser la responsable de los cambios en la morfología de la célula, la desorganización del nucleolo y la inhibición de la síntesis de ARN que se producen al inicio de la mitosis.

Con técnicas de inmunofluorescencia se ha demostrado que, al inicio de la mitosis, el complejo cdc2/ciclina se acumula en el núcleo y en los centrosomas, estructuras organizadoras de los microtúbulos. En el núcleo la proteína cdc2 fosforilaría la histona H1, laminas, nucleolinas y ARN polimerasa; en el centrosoma, fosforilaría alguna proteína o proteínas que iniciarían la polimerización de los microtúbulos. Los cromosomas condensados se unirían por sus centrómeros al huso mitótico y se produciría la segregación de sus cromátidas durante la anafase hacia los dos polos de la célula.

En anafase, el complejo cdc2/ciclina se inactiva y los sustratos de la enzima cdc2 tienen que ser desfosforilados. No conocemos bien cuál es el mecanismo por el que cdc2 se inactiva. Parece ser, sin embargo, condición necesaria la destrucción de la ciclina y la desfosforilación de cdc2 en la treonina-167. Asimismo, al final de la mitosis deben intervenir varias fosfatasas de proteína que desfosforilan los sustratos de cdc2 y revierten los cambios inducidos por ella.

Como vimos al principio de este artículo, la proteína cdc2 no es sólo necesaria para iniciar la mitosis, sino también para inducir el comienzo de la duplicación del ADN. La célula utiliza una misma proteína para regular dos procesos coordinados que deben desarrollarse consecutivamente. El papel de cdc2 al comienzo de la fase S se conoce peor que el desempeñado en el inicio de la mitosis. Sin embargo, recientemente Steve Reed, de la Clínica Scripps en La Jolla, Fred Cross, de la Universidad Rockefeller en Nueva York, y Bruce Futcher, de Cold Spring Harbor, han descrito una serie de ciclinas específicas de G_1 en la levadura *S. cerevisiae*, denominadas CLN1, CLN2 y CLN3. Estas proteínas tienen cierta analogía con la ciclina de G_2, oscilan durante el ciclo celular y se asocian a CDC28 (el homólogo a cdc2 en *S. cerevisiae*) durante la fase G_1. *Xenopus*, *Drosophila* y células humanas poseen también otras ciclinas (denominadas *A*, *C*, *D* y *E* para distinguirlas de la ciclina de mitosis, la ciclina *B*), algunas de las cuales bien pudiera ser la ciclina de G_1. Al parecer, cdc2 coopera con diferentes "compañeros" en distintos momentos del ciclo celular.

La investigación prosigue. No tardará quizás en conocerse la función de la enzima cdc2 al inicio de la fase *S*, similar al que acabamos de exponer para el comienzo de la mitosis.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIRECTING CELL DIVISION DURING DEVELOPMENT. Patrick O'Farrell, Bruce Edgar, Delia Lakich y Christian Lehner en *Science*, vol. 246, págs. 635-640; 3 de noviembre de 1989.

UNIVERSAL CONTROL MECHANISM REGULATING ONSETOF M-PHASE. Paul Nurse en *Nature*, vol. 344, págs. 503-508; 5 de abril de 1990.

CONTROL OF M-PHASE BY MATURATION-PROMOTING FACTOR. Marcel Dorée en Current Opinions in *Cell Biology*, vol. 2, págs. 269-273; abril de 1990.

SUBSTRATES OF $p34^{cdc2}$: *IN VIVO* VERITAS? Sergio Moreno y Paul Nurse en *Cell*, vol. 61, págs. 549-551; 18 de mayo de 1990.

Nikolai V. Timoféeff-Ressovsky

La controversia rodea a este genético de origen ruso, cuyas realizaciones científicas más importantes tuvieron lugar en la Alemania nazi; más tarde sería declarado reo de alta traición en la Unión Soviética

Diane B. Paul y Costas B. Krimbas

En 1925 Oskar Vogt, director del Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín para la Investigación del Cerebro, invitó a una joven promesa de nacionalidad rusa, Nikolai V. Timoféeff-Ressovsky, para que organizara en ese recinto un departamento de genética experimental. Timoféeff, que contaba 25 años, no poseía entonces ni siquiera un título universitario. Lo que no impidió que, en pocos años, se convirtiera en director del nuevo departamento y especialista de primer orden en los campos de genética de poblaciones y genética radiológica.

Timoféeff contribuyó a desarrollar una teoría influyente sobre la manera como ocurren las mutaciones, llevó a cabo la primera medición de un gen y estableció que la mayor parte de la diversidad genética en una población silvestre está oculta bajo la forma de mutaciones recesivas. Aunque los textos de historia de la genética apenas mencionan su nombre, ejerció un influjo decisivo en la investigación genética, no sólo a través de su propio trabajo, sino también a la hora de transmitir las ideas rusas sobre el mecanismo de la evolución al mundo occidental.

DIANE B. PAUL y COSTAS B. KRIMBAS han colaborado en trabajos sobre historia de la genética. Paul es catedrático de ciencias políticas de la Universidad de Massachusetts en Boston e investigador adjunto en el Museo de Zoología Comparada de la Universidad de Harvard. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Brandeis en 1975. De 1988 a 1989 fue profesor visitante en el Instituto de Ciencias de Berlín, donde realizó la mayor parte de la investigación necesaria para la redacción de este artículo. Krimbas es catedrático de genética de la Universidad Agrícola de Atenas. Se formó en las universidades de Lausanne, la Sorbona y Columbia; en esta última estudió genética con Theodosius Dobzhansky.

Estos logros destacan, además, por las circunstancias políticas, difíciles y paradójicas, en que se desarrolló su vida. Patriota ruso, sus años científicamente más productivos transcurrieron antes de la época nazi y durante la misma. Cuando las tropas soviéticas entraron en Berlín al final de la segunda guerra mundial, cayó prisionero. Por sus conocimientos en biología de las radiaciones, se le dejó continuar sus investigaciones genéticas en un laboratorio militar en una época en que ese tipo de investigaciones había sido prohibido públicamente en la URSS. Sin embargo, sus rivales políticos le acosaron durante el resto de su vida y no se le ha rehabilitado nunca.

La vida de Timoféeff plantea cuestiones espinosas: ¿Cómo podía un científico trabajar sin escrúpulos en un entorno de guerra real e ideológica? ¿Podía alguien ser genético en la Alemania nazi sin tener que comprometerse moralmente? ¿Cómo distinguir al investigador independiente del colaboracionista pasivo? Nos propusimos ahondar en esos puntos para conocer mejor la fascinante vida intelectual y política de nuestro hombre.

Los acontecimientos políticos se entrometieron desde un comienzo en las investigaciones de Timoféeff. La Revolución de Octubre estalló cuando era estudiante de biología en la Universidad de Moscú. Abandonó el centro para combatir al lado de los anarquistas y, luego, con el ejército rojo. (No concluyó formalmente su doctorado hasta 1964.) En 1922 volvió a la universidad, y allí estudió con Sergei S. Chetverikov, padre de la escuela rusa de genética de poblaciones. Chetverikov despertó el interés de su alumno por la base genética de la evolución. Al mismo tiempo, Timoféeff empezó a trabajar con Nikolai K. Kol'tsov, director del Instituto de Biología Experimental. Kol'tsov le inició en los secretos de la anatomía comparada, la morfología y la sistemática. Esta variedad disciplinar sería decisiva, andando el tiempo, en los planteamientos de su trabajo científico.

Una serie de circunstancias un tanto curiosas le movieron a abandonar Rusia para trasladarse a Berlín en 1926. Después de la muerte de Lenin en 1924, el gobierno soviético hizo los preparativos necesarios para que se llevase a cabo un estudio microscópico del cerebro del difunto dirigente, con la intención de descubrir la base material de su genio. Los soviéticos le ofrecieron a Vogt, prestigioso neurofisiólogo y psiquiatra alemán, la dirección del trabajo.

Durante su estancia en Rusia, Vogt se enteró de que Timoféeff y su mujer, Helena Aleksandrovna, habían descubierto una mutación, en la especie de la mosca de la fruta *Drosophila funebris*, que producía deformaciones muy variables en una estría de las alas. Por aquel entonces Vogt trataba de determinar por qué ciertos trastornos nerviosos heredados variaban ampliamente en su frecuencia y gravedad. El descubrimiento de que un solo tipo de mutación producía innumerables variaciones morfológicas en el ala captó la atención del alemán.

Le propuso a Timoféeff la organización del nuevo laboratorio de genética que iba a empezar a funcionar en el instituto que dirigía el propio Vogt. A pesar de sus fuertes vínculos emocionales con Kol'tsov y con su patria, Timoféeff aceptó y se trasladó a Berlín. Aunque hasta ese momento había publicado algunos artículos, resultaba un absoluto desconocido fuera del restringido círculo de biólogos

1. TIMOFÉEFF-RESSOVSKY no abandonó el cultivo de la ciencia en toda su tumultuosa vida. La fotografía recoge un momento de descanso entre dos clases, a orillas del lago Miassovo, en los años sesenta.



rusos. Durante los años transcurridos desde su llegada a Berlín hasta el estallido de la guerra, Timoféeff realizó prácticamente todo el trabajo que le diera fama como científico.

Le atraía, por encima de todo, comprender el proceso evolutivo. Se trajo a Berlín, y a Europa occidental, las ideas de Chetverikov que suponían el desarrollo de una síntesis innovadora de la genética mendeliana con el darwinismo clásico. Chetverikov tejió esas ideas por su propia cuenta, sin relación con los británicos Sir Ronald A. Fisher y J. B. S. Haldane y el americano Sewall Wright, el trío que Occidente considera fundador de la escuela neodarwiniana. Para Ernst Mayr, evolucionista norteamericano, Timoféeff fue en buena medida el promotor de la síntesis evolutiva que ocurriera en la Alemania de los años treinta.

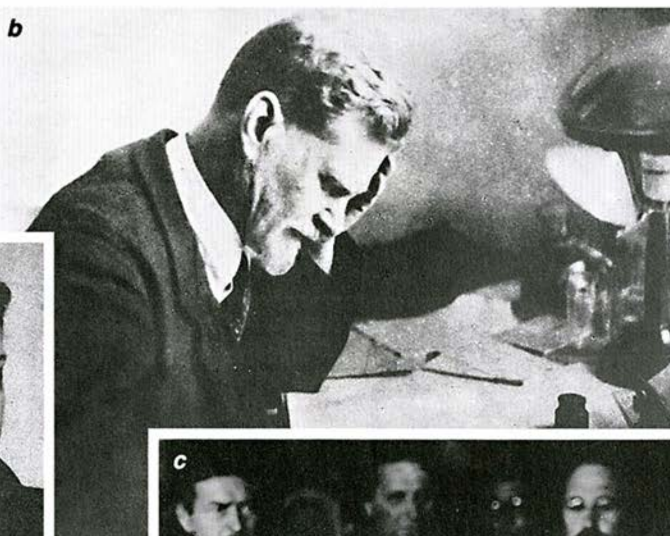
El grupo investigador de Timoféeff en el instituto incluía a destacados genéticos rusos, alemanes, rumanos y griegos, que habrían de propagar su influencia. Recibió también a numerosas personalidades, entre ellas el genético de poblaciones Adriano Buzzati-Traverso que, en cierta ocasión, se trajo consigo a sus discípulos Luigi Cavalli-Sforza (hoy en la Universidad de Stanford) y G. E. Magni (en la de Pavía). Buzzati-Traverso influyó, a su vez, en Antonio Prevosti, de la Universidad de Barcelona y, a través de él, sobre un significativo grupo de genéticos de poblaciones españoles.

De acuerdo con la concepción neodarwiniana que configuró el trabajo de Timoféeff, la selección natural sólo interviene si existe variación genética, que se produce por medio de mutaciones. Los miembros de una población, sea ésta de abedules, gorriones o moscas de la fruta, suelen manifestar una constancia morfológica notable. La variación genética está oculta porque cada individuo tiene dos dotaciones de genes, una heredada del progenitor masculino y otra del femenino. La mayoría de las mutaciones son recesivas y, por tanto, no se manifiestan en los individuos que también poseen la forma normal (forma silvestre) del gen. Chetverikov comprendió que, habida cuenta del almacenamiento escondido de la variación, la selección no precisaba esperar la aparición de nuevas mutaciones; las había ya en los genes recesivos de la población.

Timoféeff y su mujer estudiaron una población natural de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* con el propósito de someter a prueba ex-

La extraña trayectoria académica de Timoféeff-Ressovsky









El joven **Timoféeff** (*a*) recibió una formación polivalente, que le preparó para convertirse en naturalista o en genético de poblaciones matemático. Su profesor **Chetverikov** (*b*) le instruyó para reconocer la relación entre las mutaciones, la variación genética y la selección natural. La muerte de **Lenin** (*c*) en 1924 supuso un punto de inflexión en la trayectoria académica de Timoféeff. **Vogt**, representado aquí con su mujer (*d*), vino de Alemania a la Unión Soviética para estudiar el cerebro de Lenin. Allí se encontró con Timoféeff y le ofreció un puesto en el Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín para la Investigación del Cerebro. En 1926 Timoféeff se trasladó a Alemania, donde llevó a cabo sus investigaciones más importantes. La mayor parte de su trabajo se concentraba en el estudio de la naturaleza de la variación genética; con ese fin, hizo amplio uso de los métodos radiactivos. En cierto momento colaboró con **Muller** (*e*), quien ganaría el premio Nobel merced a su descubrimiento del poder mutágeno de los rayos X.

perimental la hipótesis del maestro de ambos. Al aumentar la consanguinidad de las moscas capturadas en la naturaleza, consiguieron individuos en los que ambos genes codificaban para el carácter mutante recesivo. Su artículo, publicado en 1927, suministró la primera prueba de la existencia de cantidades apreciables de variación genética oculta.

Timoféeff se sintió atraído hacia otra importante área de investigación originada en el énfasis que ponía la escuela neodarwiniana rusa sobre la relación entre el genotipo (la constitución genética de un individuo) y el fenotipo (su morfología, fisiología y comportamiento observables). Como buenos naturalistas que eran, los rusos sabían que la selección natural incide sobre el fenotipo. La relación de éste con el genotipo es, por tanto, fundamental para comprender cómo ocurren los cambios genéticos en una población. Timoféeff y su mujer, junto con el genético de origen ruso Theodosius Dobzhansky, estaban entre los primeros que se dedicaron al estudio de la pleiotropía (manifestación de un gen en más de una característica), la penetración y la expresión (la frecuencia e intensidad, respectivamente, con la que se manifiesta un gen), entre otros fenómenos.

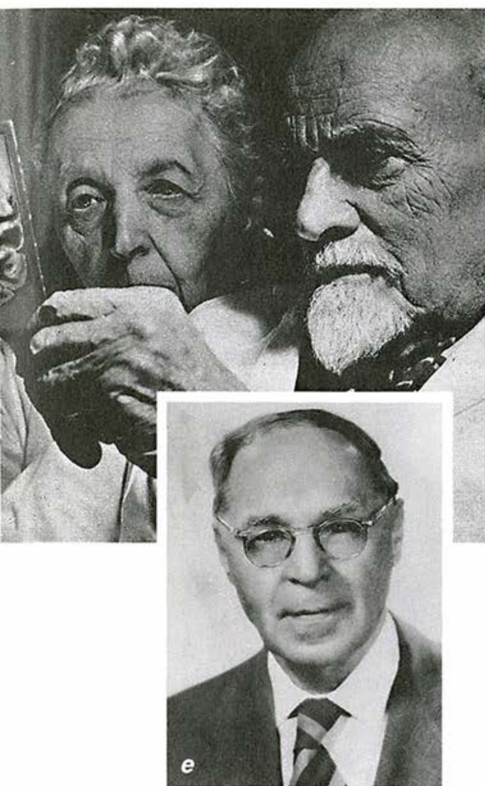
Estos estudios promovieron la concepción de que varios genes pueden influir sobre una misma característica, como pueda ser la fecundidad, y que la acción combinada de dos genes mutantes no se puede predecir necesariamente a partir de la acción individual de cada uno. Los expertos llegaron a la conclusión de que no debía contemplarse la variación genética de una población como si se tratara de un grupo de entidades genéticas sin relación de interacción (el modelo que Mayr denominó genética del "saco de judías"), sino como un todo integrado y cohesionado.

A principios del siglo XX muchos genéticos creían, siguiendo las ideas del biólogo británico William Bateson, que las mutaciones recesivas resultaban de daños o pérdidas genéticas irreversibles. Esta concepción ponía un freno a la evolución, dado que las mutaciones irían mermando el material genético utilizable. Timoféeff demostró que las líneas mutantes pueden compensar su situación revirtiendo en algún momento a las formas dominantes, es decir, silvestres. La ocurrencia de estas mutaciones inversas sería imposible si la aparición de un mutante estuviera causada por la pérdida de material genético.

Una forma de aumentar las tasas de mutación es la de irradiar a los organismos con rayos X, fenómeno comprobado en 1927 por el genético americano Hermann J. Muller. Por la orientación recibida en sus años escolares en Rusia, Timoféeff prefería las técnicas experimentales; incorporaría de inmediato las mutaciones producidas por rayos X a sus investigaciones. Algunos de sus logros sobresalientes vinieron de sus esfuerzos por desentrañar el modo en que los rayos X provocan mutaciones.

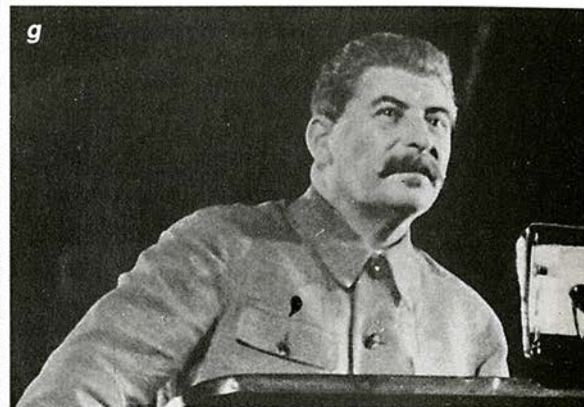
El principal descubrimiento de Timoféeff fue la observación de la existencia de una relación lineal entre la dosis de radiación total y la cantidad de mutaciones producidas. Resultaba irrelevante que la dosis se administrara de una sola vez, en varias fracciones o de un modo continuo a un bajo nivel durante un período prolongado. La intensidad de la dosis no influía en la cuantía de mutaciones producidas. También descubrió que no existía una dosis mínima por debajo de la cual no se produjeran mutaciones.

Estas propiedades sugerían que los rayos X producían mutaciones a imagen de proyectiles que dan en blanco. El y sus colaboradores alemanes Karl G. Zimmer y Max Delbrück propusieron la teoría del blanco —o de la diana— basándose en el símil





Timoféeff se vio forzado a tomar decisiones difíciles ante la tormentosa situación política de los años 30 y 40. En Alemania, los nacionalsocialistas (*f*) promocionaban la ciencia con un presupuesto generoso, pero apoyaban la eugenesia de un modo agresivo así como el desarrollo de las armas atómicas. Contemporáneamente, **Stalin** (*g*) ordenaba toda una serie de purgas represivas en la Unión Soviética, al tiempo que se condenaba la genética clásica. En 1937 Timoféeff se negó a obedecer la orden de volver a su patria.



apuntado. El artículo firmado por los tres, ahora clásico, que describía su trabajo inspiró a Erwin Schrödinger el curso de lecciones que dictara en 1943 y publicara posteriormente con el título *¿Qué es la vida?*, librito que contribuyó a atraer a muchos físicos a la biología molecular.

En el modelo de la diana, un fotón de rayos X desaloja electrones de los átomos. Los electrones libres chocan con otros átomos, desalojando más electrones, y así sucesivamente. Al final los electrones libres se instalan en las órbitas electrónicas de otros átomos. De este modo, un rayo X genera iones cargados positivamente (átomos con electrones de menos) y iones cargados negativamente (átomos con electrones adicionales). Una ionización en un gen causa una mutación.

Timoféeff y sus colaboradores se propusieron hallar el tamaño de un gen mediante el cálculo del número de ionizaciones producidas en determinado volumen de tejido y mediante el registro del aumento en la cuantía de mutaciones sufridas por determinado gen del tejido en cuestión. Descubrieron que el gen era una esfera de uno a diez micrometros de diámetro.

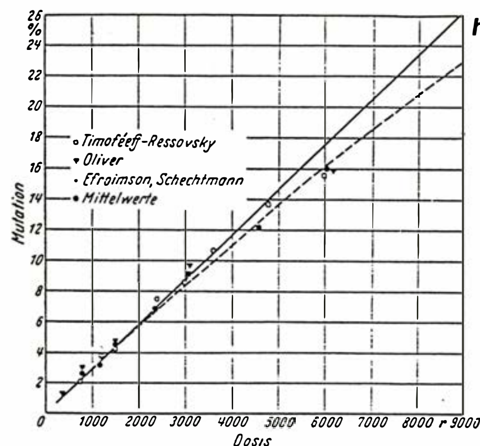
Por muy inexacto que nos parezca hoy semejante estimador, tuvo una resonancia doctrinal extraordinaria en aquel momento. El grupo de Thomas H. Morgan, de la Universidad de Columbia, había demostrado en 1910 que los genes se alojaban en posiciones fijas sobre los cromosomas. Timoféeff aportó precisión a esa descripción: el gen tiene las dimensiones de una macromolécula orgánica.

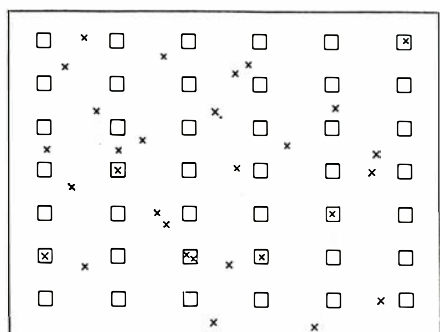
Alguien podría esperar que el grupo de Timoféeff identificara en el ADN la molécula de la herencia con el ADN. Los investigadores que estudiaban las mutaciones producidas por rayos ultravioleta habían conseguido ya algunos resultados en esa dirección. Los rayos ultravioleta producían más o menos mutaciones según fuera su longitud de onda; a sustancias distintas corresponden espectros distintos de absorción de rayos ultravioleta. Mediados los años treinta en Alemania e iniciados los cuarenta en Estados Unidos, se descubrió que las longitudes de onda ultravioleta que originaban más mutaciones pertenecían al espectro de absorción del ADN.

Los biólogos sabían que los cromosomas constaban de ADN y proteínas. Pero nadie, Timoféeff incluido, sugirió que el gen pudiera estar compuesto de ADN. Creíase, por contra, que la molécula que constituía el gen era un compuesto proteico. Dos razones justificaban tamaña confusión. En primer lugar, los químicos del momento pensaban que el ADN tenía una estructura molecular invariante. Parecía imposible que ese tipo de molécula pudiera constituir el conjunto inmenso de entidades genéticas existente.

En segundo lugar, en Alemania el conocimiento de la química de proteínas estaba mucho más adelantado que el de los ácidos nucleicos. Por los años treinta se dominaban ya muchos aspectos de la estructura de las proteínas. Sabíase, por ejemplo, que se podían sintetizar muchas proteínas diferentes combinando 20 tipos de aminoácidos en distintas ordenaciones lineales. En 1932, Max Bergmann y Leonidas Zervas, expertos en química orgánica, inventaron un método para sintetizar secuencias cortas de aminoácidos.

Estos prejuicios e ideas erróneas le impidieron a Timoféeff reconocer la importancia de la absorción ultravioleta del espectro de ADN. Hasta la caída de Berlín en 1945, su discípulo Anton Kanellis había venido trabajando sobre la relación existente entre dosis de radiación ultravioleta y cantidad de mutaciones producidas, pero no investigó el efecto de la longitud de onda.











La investigación de las mutaciones por Timoféeff y otros reveló la existencia de una relación lineal entre la dosis de rayos X y la cantidad de las mutaciones producidas (*h*). La teoría de la diana (*i*), publicada en 1937 por Timoféeff junto con **Zimmer** y **Delbrück** (*j*), mantenía que los rayos X causan mutaciones a la manera de las bombas que, disparadas al azar, dan en el blanco. Gracias a ese trabajo, Timoféeff creó un estimador algo basto, aunque de poderosísima influencia, del tamaño de un gen.

Mas conviene no olvidar que James Watson, descubridor con Francis Crick de la estructura en doble hélice del ADN, estudió con Salvador S. Luria, quien, a su vez, había colaborado estrechamente con Delbrück, coautor éste con Timoféeff del artículo antes citado. Dicho de otro modo, la proyección intelectual de Timoféeff llegó, en última instancia, hasta el hito biológico del siglo.

La productividad científica desarrollada por Timoféeff durante los años que estuvo en Alemania se entrecruza con las decisiones difíciles que hubo de sufrir por culpa del clima político imperante en Alemania y en la Unión Soviética durante los años 30 y 40. Tras la subida al poder del nacionalsocialismo en 1933, el gobierno incrementó la ayuda a la investigación genética, pero exigía también obediencia al nuevo régimen. Durante el mismo período, las autoridades soviéticas le habían instado a Timoféeff varias veces a que volviera a su patria. En 1937 recibió una orden explícita al respecto. La rechazó.

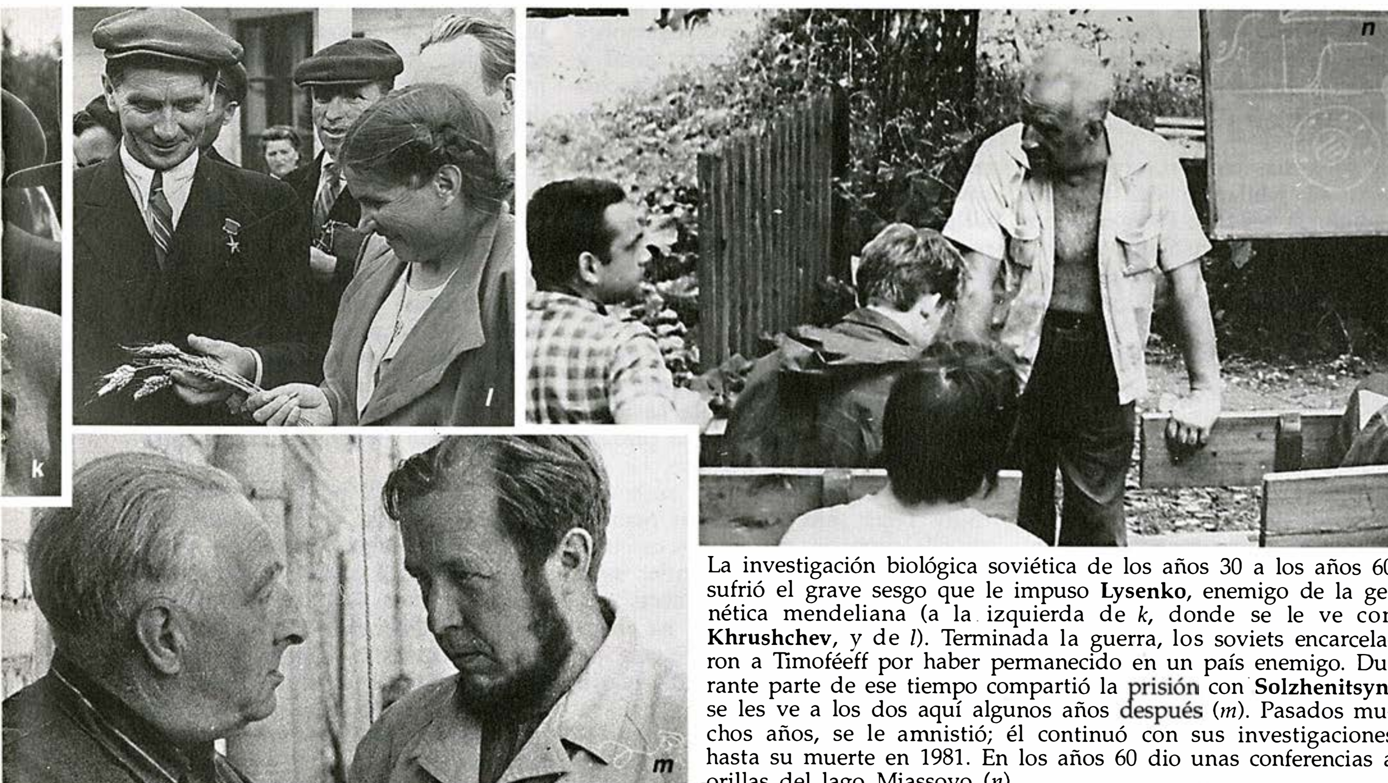
Su decisión reflejaba en parte la situación de deterioro que atravesaba la Unión Soviética. Bajo la férula del agricultor agrónomo Trofim D. Lysenko, el estudio de la genética mendeliana quedó fuera de la ley, en beneficio de sus propias ideas de acuerdo con las cuales la evolución ocurre principalmente por medio de la herencia de los caracteres adquiridos. Kol'tsov había sido destituido como director de su instituto; Chetverikov había sido arrestado y desterrado. El terror estalinista se expandía con toda su fuerza. Hacia la mitad de la década de los treinta, dos hermanos menores de Timoféeff y muchos parientes de su mujer fueron arrestados; un hermano suyo fue ejecutado. Imaginando que quizás obedeciera la orden de retorno, Kol'tsov le advirtió: "De todos los métodos de suicidio, vas a elegir el más penoso y difícil. Y no sólo para ti, sino también para tu familia."

Se le ofrecieron otras opciones, incluida la posibilidad de trabajar en los EE.UU. El Instituto para la Investigación del Cerebro estaba muy ligado desde hacía tiempo a la Fundación Rockefeller. Cuando llegó la noticia de que Timoféeff podría abandonar la Alemania nazi, la fundación contribuyó a conseguirle un puesto en la Institución Carnegie, en el recinto de Cold Spring Harbor en Long Island. Para sorpresa de sus valedores, rechazó la oferta.

Timoféeff aducía la responsabilidad que le ligaba con sus colaboradores y ayudantes, que perderían sus puestos tras su marcha; tampoco le agradaba la idea de trasladar a su familia, y objetaba el apoyo técnico inferior —y categoría social— que tenían los profesores en América. "He oído que América también se está volviendo chauvinista", añadía. Le había comentado al físico francés Charles Peyrou que las condiciones de trabajo de los científicos en Estados Unidos no eran buenas.

Al igual que más de un académico coetáneo suyo, Timoféeff utilizó la oferta americana para intentar mejorar sus condiciones en el Instituto para la Investigación del Cerebro. Se le garantizó plena autonomía a su departamento, salvo en lo concerniente a las demandas de material. La independencia del genético aumentó más adelante merced a su colaboración con sus colegas de la Sociedad Auer, un consorcio químico gigantesco implicado en la industria bélica, especialmente en la producción de uranio para el proyecto atómico alemán. Cuando Alemania le declaró la guerra a la URSS en 1941, se esfumó la posibilidad de retorno a su país.

En las postrimerías de la guerra, el personal del Instituto para la Investigación del Cerebro fue evacuado a Göttingen. De nuevo, Timoféeff



La investigación biológica soviética de los años 30 a los años 60 sufrió el grave sesgo que le impuso **Lysenko**, enemigo de la genética mendeliana (a la izquierda de *k*, donde se le ve con **Khrushchev**, y de *l*). Terminada la guerra, los soviets encarcelaron a Timoféeff por haber permanecido en un país enemigo. Durante parte de ese tiempo compartió la prisión con **Solzhenitsyn**; se les ve a los dos aquí algunos años después (*m*). Pasados muchos años, se le amnistió; él continuó con sus investigaciones hasta su muerte en 1981. En los años 60 dio unas conferencias a orillas del lago Miassovo (*n*).

podía haber huido, pero eligió permanecer en Berlín, donde con un puñado de colaboradores esperó la llegada del ejército rojo. Algunos de sus amigos creen que Timoféeff esperaba se le reconociera como antinazi. Además, muchos científicos alemanes, y él también, habían llegado a pensar si no sería mejor colaborar con los rusos, necesitados de científicos, que con los americanos, libres de esa carencia. En cualquier caso, se resistía tenazmente a trasladarse al mundo occidental. Delbrück creía que Timoféeff sabía que iba a ser arrestado, pero prefería ser condenado en la URSS a convertirse en un refugiado. Timoféeff le confesó a Peyrou la noche antes de que llegara el ejército rojo que era consciente de que su decisión de permanecer en Berlín podía resultarle fatal.

Cuando las tropas soviéticas llegaron, fue detenido, pero Avrami P. Zavenyagin, subcomisario de interior, lo puso en seguida en libertad. Zavenyagin sabía que sus investigaciones en radiobiología y genética radiológica podrían ser importantes para el proyecto atómico soviético. La situación de Timoféeff cambió de nuevo cuando llegó una delegación de la Academia de Ciencias de Moscú y se ordenó nuevamente su arresto.

Esta vez, se le envió a prisión. Durante una temporada estuvo en la misma cárcel que Alexander Solzhenitsyn, quien nos describe en *El archipiélago Gulag* los seminarios científicos que organizaba Timoféeff en ese lugar. Después de algunos meses, se le envió a un campo de trabajo al norte de Kazakhstan. Pasaron dos años sin que sus amigos y familia supieran dónde estaba exactamente, y ni siquiera si seguía vivo.

Afortunadamente, Zavenyagin todavía tenía sus propios planes. Tras prolongada búsqueda, le localizó, ya próximo a la muerte por inanición y casi ciego por falta de vitamina A (nunca recobraría completamente la vista). En 1947 se le trasladó a un centro secreto de investigación militar cerca de Sverdlovsk, en los Urales; allí organizó un laboratorio de biología radiológica. Se les comunicó a su mujer y segundo hijo, así como a algunos de sus colaboradores anteriores, que se reunieran con él.

Durante la década siguiente, Timoféeff labró el nuevo campo de la biogeocenología radiológica, que estudia el análisis de la distribución, acumulación y migración de isótopos radiactivos en sistemas biológicos naturales y experimentales. A causa de la naturaleza secreta de su trabajo, fue uno de los pocos científicos soviéticos a quienes se les permitió que continuaran sus investigaciones en genética durante la era de Lysenko.

En 1955, dos años después de la muerte de Stalin, se benefició de una amnistía. Se trasladó a Sverdlovsk y allí organizó un laboratorio de biofísica en la División de los Urales de la Academia de Ciencias; también creó una estación experimental y una escuela de verano a orillas del cercano lago Miassovo. Esta escuela desempeñó un papel decisivo a la hora de conservar viva la tradición de la genética clásica durante el dominio de Lysenko. En 1964 marchó a Obninsk (80 kilómetros al sudoeste de Moscú) para crear el departamento de genética y radiobiología del nuevo Instituto de Medicina Radiológica.

Aunque recibió varias distinciones de sociedades científicas extranjeras, no se le permitió nunca viajar fuera de su país; tampoco estaba autorizado para publicar en revistas científicas de divulgación. Creció su prestigio entre sus compatriotas, pero sus continuas declaraciones en público sobre cuestiones genéticas provocaron la ira de los lysenkoístas. Todavía en 1968, cuatro años después de que Lysenko perdiera la protección

oficial, los lysenkoístas bloquearon la propuesta de admitir a Timoféeff en la Academia de Ciencias Soviética. Le acusaron de colaboración con los nazis y de haber llevado a cabo experimentos con prisioneros de guerra soviéticos.

Dos años más tarde sus oponentes forzaron su jubilación del Instituto de Radiología Médica. Pasó entonces a ser asesor de los Institutos de Problemas Biológicos Médicos y de Biología del Desarrollo, donde estudiaría medicina espacial y continuaría sus investigaciones en genética hasta su muerte en 1981.

En la estela de la transformación política, de alcance histórico, que está atravesando Alemania y lo que fuera la Unión Soviética, la vida de Timoféeff cobra especial significado. Se asiste a un interés creciente por su figura. Una serie de documentales cinematográficos soviéticos a él dedicados ha cosechado un gran éxito. En 1987, el ruso Daniil Granin, divulgador científico reconocido y amigo de Timoféeff, publicó *Zubr* (*El bisonte*), novela que lo describe como víctima heroica del estalinismo y del lysenkoísmo. La controversia originada por el libro fue tan intensa y ácida, que la edición germana no se distribuyó en Alemania oriental.

Una de las cuestiones más candentes se refiere a su supuesta colaboración con los nazis durante su período alemán. En un artículo muy sentido, Raissa L. Berg, experta en genética de origen ruso que le conoció en la Unión Soviética, asegura que "debe colocarse junto a Galileo y otros grandes científicos perseguidos por las autoridades de su tiempo". Berg se inscribe en el grupo de quienes, desde Alemania, EE.UU. y la URSS, consideran a nuestro genético un archiantinazi que pasó los años de la guerra ocupado en sus investigaciones.

Milita en el bando contrario Oliver Tolmein. En su opinión, Timoféeff estaba profundamente comprometido en las investigaciones sobre higiene racial y en la fabricación de un arma atómica. Tolmein piensa que la verdad histórica se ha "sacrificado sobre el altar del antiestalinismo": todos los que se opusieron a Stalin deben reputarse héroes, por muy lamentables que fueran sus otras actividades y creencias.

Benno Müller-Hill, genético de la Universidad de Colonia, adoptó una postura intermedia en su recensión de *El bisonte*. Timoféeff poseía, expone, una personalidad compleja: si bien ayudó a mucha gente en peligro, en ocasiones sazonó los aspectos técnicos de sus investigaciones con la jerga de la higiene racial y dirigió sus estudios hacia aspectos afines al régimen nazi. La recensión de Müller-Hill provocó una acalorada respuesta por parte de los biólogos soviéticos, para quienes, si no fue un villano, tuvo que haber sido un héroe, las dos únicas alternativas posibles en una sociedad totalitaria.

Timoféeff se contaba entre la minoría de los biólogos que no se afiliaron al partido nacionalsocialista, ni a ninguna de sus organizaciones subsidiarias. Rehusó adoptar la nacionalidad alemana, a pesar de la presión de sus superiores jerárquicos. Le comentaba a Peyrou a ese respecto: "Muy señor mío, he nacido ruso, y no veo ninguna manera de cambiar ese hecho." Natascha Kromm, ayudante suya en el instituto, decía que "más que patriota ruso, era un chauvinista". Se jactaba abiertamente de la potencia soviética en la guerra con Alemania, comentarios que le valieron una amonestación del secretario general de la Sociedad Kaiser Wilhelm.

Desde 1943, tenía razones personales para odiar a los nazis. Ese año, su hijo mayor, Dimitri, enrolado en la resistencia, cayó prisionero. A pesar de los grandes esfuerzos que hizo su padre para salvarle, Dimitri perecería en el campo de concentración de Mauthausen en 1944.

Fue, y vale la pena destacarlo, uno del puñado de científicos que se prestaron a proteger a los perseguidos, incluyendo personas de ascendencia judía, refugiados rusos, prisioneros de guerra y *zwangesarbeiter*, es decir, extranjeros obligados a trabajar en las fábricas alemanas. Los Institutos Kaiser Wilhelm en Berlín estaban considerados *kriegswichtig*, de interés preferente en la logística de la guerra, lo que les facultaba para contratar trabajadores. Timoféeff podía disponer de varios prisioneros y trabajadores forzados; justificaba su solicitud exagerando su capacidad profesional y las posibilidades de su contribución a las exigencias de la guerra. Con otros trabajadores hubo que falsificar documentos, incluido el de identidad.

Es difícil comprender la decisión de proseguir con sus investigaciones en la Alemania nazi. Con la ventaja que supone considerar los acontecimientos retrospectivamente, es obvio que debería haber aceptado la invitación de Cold Spring Harbor, o haber buscado colocación en otro centro europeo. Pero a mediados de los años treinta había incluso científicos judíos que se resistían a abandonar su patria. Richard Goldschmidt, genético también, sólo se marchó cuando le destituyeron sin explicaciones de su puesto directivo del Instituto Kaiser Wilhelm.

Dicho esto, la decisión que tomó Timoféeff de permanecer en Alemania equivalió de hecho a una voluntad colaboracionista con los nacionalsocialistas. Como mínimo, supuso avalar con su prestigio al régimen a cambio del apoyo notable que el partido daba a la investigación científica, especialmente en lo referente a la inducción experimental de mutaciones.

Las presiones políticas sobre los científicos en la Alemania nazi eran casi imperceptibles. Estos no tenían que afiliarse al partido para obtener becas de investigación; Ute Deichmann y Müller-Hill han demostrado que incluso estar afiliado al partido no suponía necesariamente jugar con ventaja. Timoféeff había conseguido una independencia asombrosa en su laboratorio. Además, el Instituto para la Investigación del Cerebro se hallaba en las afueras de Berlín, donde la presencia nazi no era tan agobiante.

Aun así, la política alemana se entrometía necesariamente en la vida del instituto. En mayo de 1933 la ley nazi sobre los funcionarios se amplió a la Sociedad Kaiser Wilhelm. Todos los judíos fueron inmediatamente destituidos a excepción de los directores de instituto, que se les permitió seguir hasta finales de 1935. Vogt, que dirigía el instituto donde trabajaba Timoféeff, fue destituido en 1936 a causa de su aversión hacia el nacionalsocialismo.

La presencia nazi aparece también en varios compromisos a los que Timoféeff llegó con el régimen. Participó en un ciclo de conferencias para médicos de las S.S., aunque parece ser que sólo trató de cuestiones técnicas sobre investigación de las mutaciones. Firmaba la correspondencia oficial con el consabido "Heil Hitler". Publicó en revistas médicas nazis como *Ziel und Weg* (*Fines y medios*) y *Der Erbarzt* (*El médico genético*), en donde escribía sobre la necesidad de identificar a los portadores de enfermedades genéticas heterocigóticos, aquellos que tienen una dotación de genes mutante. Al estar la mayor parte de los genes deletéreos ocultos en individuos de apariencia normal, explicaba, un programa eficaz que reduzca la incidencia de la enfermedad genética requie-

re un método que detecte a los portadores en cuestión.

Nunca especificó qué medidas deberían tomarse si dichos portadores fueran identificados. Con todo, esa línea de investigación parecía apoyar las teorías de higiene racial nazi, que resaltaban el interés que revestía la depuración de la línea genética alemana. Los nacionalsocialistas utilizaron ese principio doctrinal como argumento para exterminar a seres "impuros", judíos sobre todo. Las investigaciones de Timoféeff en biología radiológica se consideraron, asimismo, importantes para conocer los posibles efectos de las armas atómicas sobre la población humana.

Por su trato con la Sociedad Auer y con los investigadores del Instituto de Física Kaiser Wilhelm se ha sugerido una plausible implicación en el proyecto atómico alemán. El grupo de Timoféeff en el Instituto para la Investigación del Cerebro realizó estudios de protección radiológica y dosimetría neutrónica financiados por Walter Gerlach, director del programa alemán de investigación atómica. Pero el proyecto atómico no se limitaba a la fabricación de una bomba, sino que abarcaba otros frentes, incluidas las aplicaciones civiles de la energía nuclear. No parece que Timoféeff se involucrara nunca en el desarrollo armamentístico, aunque trabajara con gente que sí lo estaba y se hallara estrechamente ligado a ellos, como era el caso de Nikolas Riehl (químico de origen ruso de la Sociedad Auer) y Pascual Jordan, físico. Riehl insiste en que sus relaciones laborales surgieron del interés de muchos físicos por ciertos problemas de biofísica y que Timoféeff no tenía "ninguna relación en absoluto" con el desarrollo armamentístico.

Quizá la acusación más grave contra Timoféeff la haya lanzado Müller-Hill en la reseña mencionada. Denunciaba allí que algunos de sus colaboradores inyectaban en humanos torio X radiactivo (nuestro radio 222) para averiguar el tiempo de permanencia de ese isótopo en el organismo. Estos experimentos se llevaron a cabo en el instituto de Timoféeff y con su conocimiento. Los investigadores no identificaron a estas personas ni tampoco especificaron la cantidad de dosis inyectada.

Se ha convertido en tópico afirmar que la dosis se mantuvo secreta, por más que existan dos publicaciones, cuando menos, en las que se indica explícitamente que en los experimentos se empleaban unos 30 microcuries de torio X. Un autor soviético ha calculado recientemente que la citada dosis de torio X habría sido letal. Esta afirmación traumática estaba basada en una serie de patrones radiactivos publicados por R. D. Evans, experto en radioterapia. Pero lo que Evans examinó fueron los efectos del radio 226 que tiene una vida media de 1600 años, mientras que la vida media del torio X es de 3,64 días. A causa de su prolongada vida media, el radio 226 produce una radiación total mucho mayor durante el tiempo que permanece en el organismo. La verdad es Evans asegura que una dosis de 30 microcuries de torio X no produce efectos nocivos apreciables.

La controversia sobre la vida de Timoféeff no se ha cerrado. En 1988 el gobierno soviético se negó a considerar una demanda de rehabilitación, con la excusa de que había llevado a cabo investigaciones que reforzaron el poderío militar fascista, "una traición a la madre patria por haberse pasado al enemigo". El 16 de octubre de 1991, el procurador general de la URSS afirmó que no había existido base legal para la acusación original de traición que se cursara en 1946.

Cualquiera que sea el veredicto definitivo, los logros científicos de Timoféeff son innegables. Hizo contribuciones notables a la comprensión de la naturaleza del gen, de la variación genética y de los efectos biológicos de las radiaciones, contribuciones que no han sido debidamente reconocidas en occidente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SERGEI CHETVERIKOV, THE KOL'TSOV INSTITUTE, AND THE EVOLUTIONARY SYNTHESIS. Mark B. Adams en *The Evolutionary Synthesis: Perspectives on the Unification of Biology*. Compilación de Ernst Mayr y William B. Provine. Harvard University Press, 1980.

TIMOFÉEFF-RESSOVSKY, NIKOLAI VLADIMIROVICH. Bentley Glass en *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 18, Suplemento II. Compilación de Frederic L. Holmes. Charles Scribner's Sons, 1990.

IN DEFENSE OF TIMOFÉEFF-RESSOVSKY. Raissa L. Berg en *Quarterly Review of Biology*, vol. 65, n.º 4, páginas 457-479; diciembre de 1990.

BIOLOGICAL RESEARCH OF UNIVERSITIES AND KAISER WILHELM INSTITUTES IN NAZI GERMANY. Ute Deichmann y Benno Müller-Hill en *Science, Technology, and National Socialism*. Compilación de Monika Renneberg y Mark Walker. Cambridge University Press (en prensa).

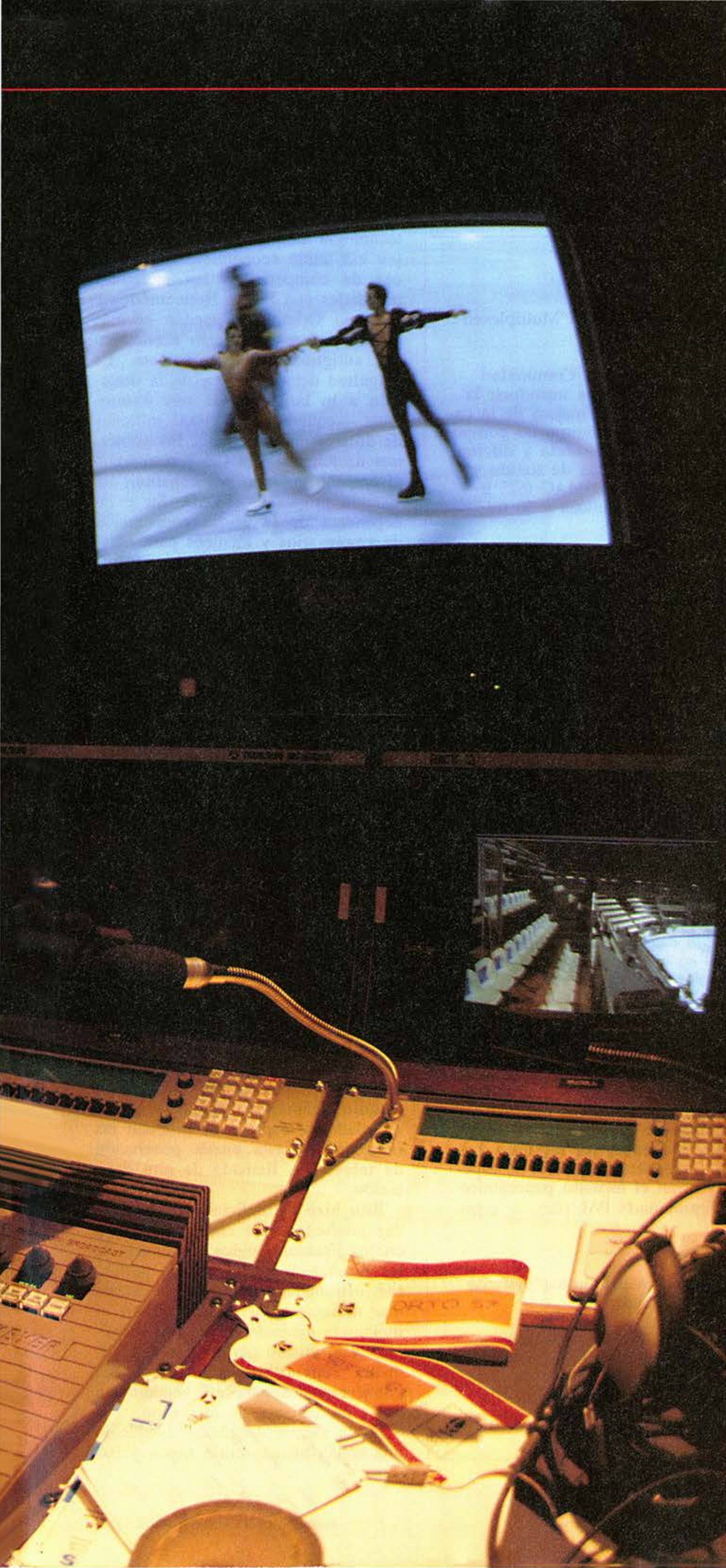
SCIENTIFIC RESEARCH IN NATIONAL SOCIALIST GERMANY. Kristie Macrakis. Oxford University Press (en prensa).

IMAGENES PERFECTAS

Elizabeth Corcoran



1. LOS INGENIEROS Y MONTADORES DE IMAGENES se ejercitan en la creación de programas de alta definición, como preparación para los Juegos Olímpicos de Invierno, celebrados en febrero de 1992 en Albertville, Francia.



Europa ha apostado fuerte por la TVAD. Su éxito y penetración van a marcar el año 1992 como rampa de lanzamiento de una potencia tecnológica común y compartida

No hace mucho, millones de espectadores presenciaban el desarrollo de los Juegos Olímpicos de invierno, inaugurados el 8 de febrero de 1992 en Albertville, Francia. Desde sus comienzos, la televisión ha sido un formidable instrumento para presentar al mundo los acontecimientos deportivos, y en particular las Olimpíadas de la era moderna le deben su enorme popularidad.

Sin embargo, en las emisiones dedicadas a las Olimpíadas de este año (las pasadas de Albertville y las próximas de Barcelona), así como en la Exposición de Sevilla, aparece algo radicalmente innovador en Europa y que va a influir en sectores cada vez más amplios de la sociedad: la televisión de alta definición (TVAD). En esencia, se trata de mejorar considerablemente la calidad de las imágenes recibidas en el televisor mediante la duplicación del número de líneas de imagen exploradas con respecto a la televisión convencional, y la adopción de otro formato ("relación de aspecto") más adecuado a la visión humana.

Fue en la Olimpíada de Berlín (1936) donde se presentó la televisión en blanco y negro, y en Grenoble (1968) donde se transmitió en color por primera vez

en Europa; éstas del 92 quedan ya marcadas como hito histórico de la presentación pública del sistema de TVAD desarrollado en el seno de la Comunidad Económica Europea. Durante 12 horas diarias se ha transmitido en televisión de alta definición desde Albertville, y en 50 salas o auditorios de Europa se presenciaron, en pantallas gigantes, imágenes de calidad comparable a las de una película cinematográfica de 35 milímetros.

Este lanzamiento en 1992 de la TVAD en Europa viene a coronar treinta años de esfuerzos en lo político y en lo económico para forjar una unidad europea, que arrancará en 1993 con un mercado único de 12 países y 340 millones de consumidores. Supone aceptar el reto de constituir empresas potentes y de tecnología puntera que, estimuladas por esa unión económica, sean capaces de competir en los mercados mundiales con las de Norteamérica y Extremo Oriente, y puedan además catalizar el resurgimiento económico del antiguo bloque comunista. La magnitud del esfuerzo y de la inversión a lo largo de los seis últimos años —equivalente a 1000 millones de dólares, aportados por los gobiernos nacionales y la CE— testimonia el empeño europeo por constituir un sistema propio de TVAD. Su éxito dependerá de la eficaz cooperación de empresarios y técnicos para obtener productos comercializables y que alcancen gran aceptación en sus propios mercados, con ventaja sobre los competidores extraeuropeos.

Normas de transmisión

MAC
Componentes analógicas multiplexadas ("Multiplexed Analogue Components")

Familia de normas desarrolladas en la Comunidad Europea durante los años ochenta para introducir la radiodifusión de TV por satélite y la mejora de la calidad. Se basa en multiplexar en el tiempo las componentes analógicas de la imagen (luminancia y diferencias de color) con señales digitalizadas de sonido y de datos. Forman parte de ella la D2-MAC (625 líneas) y la HD-MAC (1250 líneas), ambas a 50 tramas por segundo.

MUSE
Sistema de codificación con muestreo sub-Nyquist múltiple ("Multiple-Sub-Nyquist Sampling Encoding")

Norma elaborada en Japón durante los años setenta para radiodifusión por satélite de TV de alta definición. El sistema MUSE trabaja con definición de 1125 líneas, a 60 tramas por segundo. Desde noviembre del año pasado, Japón ha iniciado la transmisión regular de TVAD por el sistema MUSE durante ocho horas al día.

NTSC
Comisión nacional de sistemas de televisión ("National Television Systems Committee")

Preparada en EE.UU. y adoptada en otros países, como Japón y Canadá, NTSC ofrece una definición de 525 líneas a 60 tramas por segundo. Decana de todas las normas, fue concebida para transmisiones en blanco y negro, aunque el color pudo añadirse más tarde. Las transmisiones en blanco y negro se iniciaron en 1941, y las de color, en 1954.

PAL
Líneas con alternancia de fase ("Phase Alternation Line")

Norma desarrollada en Europa, de acuerdo con la frecuencia de la red eléctrica (50 Hz), como alternativa a la señal de color lograda por NTSC. Los sistemas PAL ofrecen 625 líneas a 50 tramas por segundo. Las transmisiones regulares comenzaron en 1967. Se espera que una nueva versión, en el formato panorámico de la TVAD (16 × 9), denominada PAL-plus, se introduzca en 1995.

SECAM
Sistema electrónico de color con memoria ("Système Electronique Couleur Avec Mémoire")

Francia desarrolló la norma SECAM en los años sesenta, como otro sistema posible de TV en color, siendo adoptada por Rusia y numerosos países de Europa del Este. A semejanza de PAL, proporciona 625 líneas a 50 tramas por segundo. Sus transmisiones regulares se iniciaron también en 1967.

Historia: la batalla de las normas

Todo comenzó en Japón, a principios de los años setenta, cuando NHK (sociedad estatal de radiodifusión) comenzó a investigar sobre las distintas maneras de mejorar la televisión, y se llegó a la conclusión avalada por una serie de pruebas psicoópticas de que el espectador recibiría una sensación de realidad mucho más viva si se modificara la relación de anchura a altura (relación de aspectos) de la imagen, para asemejarla a la que se proyecta en una pantalla de cine, y además se duplicara la resolución (definición) de la imagen, tanto en sentido vertical como horizontal. Al cabo de diez años, ya se estaban construyendo en Japón prototipos de los equipos de estudio (cámaras, magnetoscopios, mezcladores) capaces de producir las imágenes de esta nueva generación de televisión, llamada de alta definición.

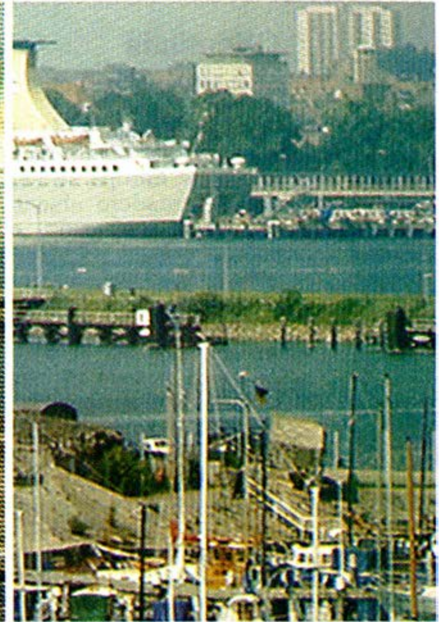
Esto hizo las delicias de los grandes productores de cine y televisión en los Estados Unidos, a quienes se les brindaban nuevos y más perfectos instrumentos para realizar filmes que tuvieran gran aceptación en el incipiente mercado de la alta definición y al mismo tiempo fueran fácilmente convertibles a los formatos convencionales para así venderlos a todas las cadenas de televisión.

En la última década se estableció una sólida alianza entre Japón y Es-

tados Unidos. La base de esa acción concertada era muy firme: una norma común cimentada sobre una misma frecuencia de suministro eléctrico primario: los 60 hertz que se utilizan en Norteamérica y países de Extremo Oriente, mas no en Europa ni otros continentes donde la corriente alterna se suministra a 50 hertz. Si se conseguía elevar esa norma al rango mundial los fabricantes europeos del ramo podían echarse a temblar, toda vez que la adaptación de sus medios de producción a la nueva norma encarecería inaceptablemente el producto final, que no sería competitivo con los importados de Asia. Además, la compatibilidad de la TVAD con los receptores de televisión actuales en Europa sería enormemente dificultosa, implicando tal cantidad de conversiones y adaptadores que haría retroceder al consumidor medio.

Los grandes fabricantes europeos de electrónica de consumo, como Thomson, Philips o Siemens, comprendieron en los primeros años ochenta el peligro inminente de ver su mercado arrasado y su tecnología malgastada, y consiguieron reunirse para movilizar a la Comisión Europea de la CEE en defensa de sus intereses. Este organismo, responsable de marcar directrices para la Comunidad, promovió y coordinó un amplio plan o ramillete de proyectos denominado Eureka, dentro del cual se inscribía la elaboración de normas europeas para la producción, transmisión y recepción de señales de televisión de alta definición (proyecto Eureka 95). Al mismo tiempo se presentó batalla en el seno de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), consiguiendo en la reunión del CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radio) en Dubrovnik, 1986, que no se impusiera como norma mundial el sistema de TVAD japonés, sino que se abriera un período de espera en el cual los fabricantes y sociedades radiodifusoras pudieran establecer una norma propia europea y dedicarse a poner a punto los productos basados en la misma.

Como queda dicho, ha sido la Comisión Europea quien ha levantado la bandera de la competitividad. Filippo Maria Pandolfi, comisario europeo para ciencia y tecnología, esgrime orgulloso el Título VI del Acta Unica Europea, donde se lee: "Será objetivo de la Comunidad fortalecer la base científica y tecnológica de la industria europea y alentarla a ser más competitiva a nivel internacional." Pandolfi toma esta declaración como "su biblia" y afirma que la Comisión ha de promover y conducir con firmeza proyectos de ambicioso alcance, en los que intervengan tecnologías consideradas como claves de la competitividad de la industria europea.

2. DUPLICAR EL NUMERO DE LINEAS de una imagen de televisión europea convencional (*izquierda*) desde 625 a 1250 líneas es una de la claves de las imágenes de alta definición (*derecha*).

El resultado está a la vista. Por un lado, Europa se apresta a iniciar las demostraciones masivas de su sistema de alta definición, fruto del esfuerzo de unos 30 grupos de investigación y empresas con el respaldo de sus respectivos gobiernos dentro del programa Eureka, y prevé comenzar las emisiones comerciales de TVAD en 1994. Por otro lado, los japoneses no han cedido ni un ápice, y continúan siendo los líderes en la carrera hacia la TVAD. Desde noviembre del año pasado se transmite en Japón ocho horas diarias en alta definición, y también ellos van a trasmitir en su sistema de TVAD desde los Juegos Olímpicos.

Los rezagados son, por esta vez, los Estados Unidos. Por motivos industriales y recelos políticos no han querido las empresas americanas ni el gobierno asumir un papel activo en la marcha hacia la TVAD. No obstante, su estrategia ha dado ahora un giro radical, y se disponen a saltar a una generación de televisión todavía más avanzada que la TVAD actual: los sistemas enteramente digitales. Se añadirá entonces un nuevo estímulo a la competición mundial por sistemas de televisión cada vez más perfectos y asequibles a mayor número de espectadores.

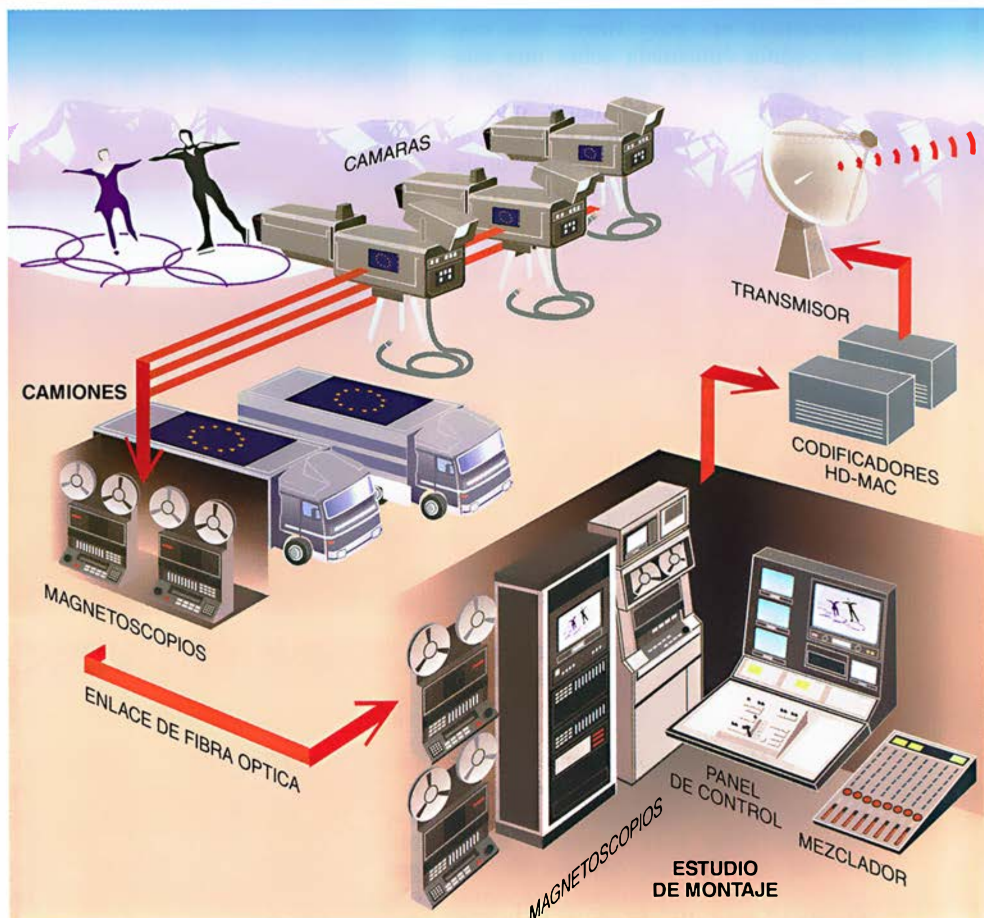
Las claves de la TVAD

Al terminar los años setenta, en Europa se trabajaba con ahínco en la digitalización de los procesos implicados en la televisión. La mayoría de los estudios de producción utilizaban ya técnicas digitales en la manipulación interna de las señales, previamente convertidas a trenes de bits a partir de las señales analógicas que recogen las cámaras. Con ello se facilitan los procesos de montaje, mezcla y todas las operaciones necesarias para conseguir la sucesión de imágenes que ha de emitirse. Pero se apuntaba más alto, hacia una digitalización total, extendida hasta la propia pantalla del televisor doméstico. Y esta línea, emprendida por varias empresas europeas, tuvo que detenerse para dar paso al programa de TVAD cubierto por Eureka; todos los recursos se aunaron para crear, ante todo, un sistema europeo capaz de competir con el japonés e incluso de superarlo.

Por otra parte, como señala Robert Boyer, jefe de laboratorio de televisión digital en Thomson, en aquel tiempo no tenía mucho sentido desarrollar un sistema TVAD enteramente digital, puesto que, al no disponer de los equipos electrónicos necesarios para modular y comprimir la señal de imagen, la transmisión de las señales de vídeo digitalizadas ocuparía una anchura de banda muy superior a la que requiere la transmisión analógica, y es sabido que la limitación del espectro de radiofrecuencias

Olimpíada en alta definición

Las emisiones de televisión de alta definición desde los escenarios olímpicos de Europa se han apoyado en un verdadero arsenal tecnológico para la grabación, el montaje, la transmisión y la visualización de unas imágenes de gran precisión. En los terrenos de competición, toda una flota de camiones cargados con cámaras y magnetoscopios han captado las imágenes en vivo, transmitidas por cables de fibra óptica a los estudios centrales. Allí, los técnicos de montaje han combinado secuencias de diferentes eventos y dejado preparado el programa para su transmisión. Las señales generadas en los estudios, comprimidas y codificadas adecuadamente, se transmitieron vía satélite a docenas de salas abiertas al público. En cada una de tales salas o teatros, se han podido contemplar las pruebas deportivas en una serie de pantallas, grandes o más reducidas, gracias a la financiación aportada por las empresas, las administraciones y la Comunidad Europea en el marco del programa Vision 1250. Hubo 50 salas de este tipo para la Olimpíada de invierno y habrá unas 100 para los Juegos Olímpicos de Barcelona.

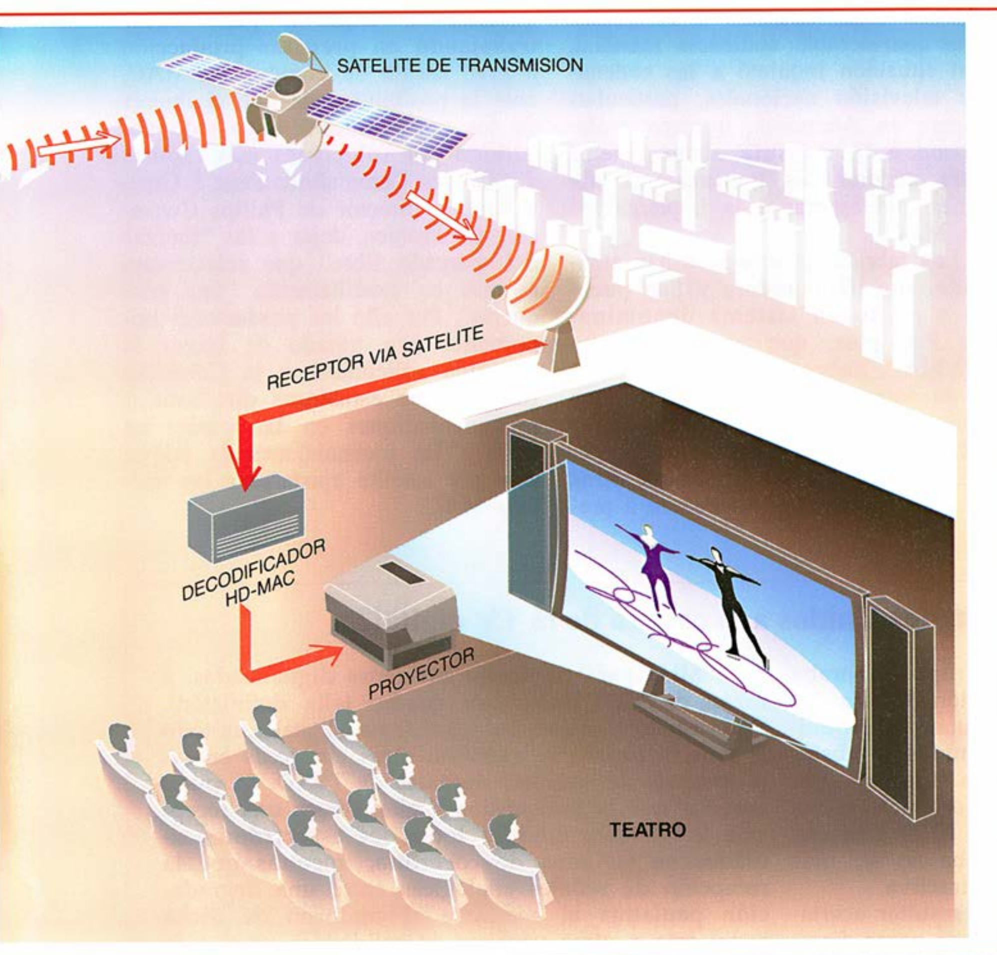


—recurso escaso, compartido por tantos servicios de telecomunicación y sometido a un estricto control internacional— constituye el obstáculo más serio interpuesto en la senda de la TVAD.

Se acometió, por tanto, el trabajo de preparación de la Norma europea. El punto de partida, común con el adoptado por NHK en Japón, consistió en admitir unas características esenciales definitorias de todo posible sistema de TVAD, a saber: a) duplicar la resolución espacial (tanto vertical como horizontal) de la imagen; en Europa, se pasaría de 625 a 1250 líneas por cuadro. b) Mejorar la resolución temporal (mayor nitidez de imágenes en movimiento). c) Separar la señal de vídeo en varias componentes analógicas, una de brillo o luminancia, y dos de diferencia de color (crominancia), que luego se multiplexan (preferiblemente por división en el tiempo) para ser transmitidas por vía radioeléctrica terrenal o a través de satélite. d) Producir las imágenes en un formato extendido, más agradable al usuario; se ha adoptado la relación de aspecto 16 × 9. e) Transmisión de señales digitales de sonido en alta fidelidad, así como de canales de datos con informaciones relativas a los procesos de transmisión y recepción.

Un sistema de TVAD basado en estas premisas y sin aplicar ningún tratamiento especial a la señal necesitaría una anchura de banda de base de unos 60 MHz, que es del orden de cinco veces la que establecen las normas analógicas convencionales y las disponibilidades del espectro. Es preciso, pues, aplicar técnicas de compresión que permitan alojar la señal de TVAD en una banda de 8 a 12 MHz, según los casos. Para ello se utiliza el submuestreo, consistente en recoger un número menor de muestras de la señal, despreciando parte de la información contenida en la señal original sin causar no obstante una apreciable degradación de la calidad de la imagen. Esto es factible si el receptor puede reconstruir imágenes suplementando la incompleta información que transportan las muestras con información que tenga almacenada en su memoria, correspondiente a partes estáticas de la imagen (un dibujo en la pared, por ejemplo). Para transmitir imágenes en rápido movimiento habría que muestrear con mayor frecuencia, pero de todos modos la vista humana no podría percibir los detalles añadidos. Asimismo, la reconstrucción de imágenes de objetos muy detallados y de movimiento pausado recurre a unos "vectores de movimiento", que ofrecen al receptor de televisión los datos adicionales necesarios para obtener una imagen satisfactoria.

El sistema de TVAD japonés, basado en la norma MUSE, tropezó también con el problema de la anchura de banda. Hasta aquel momento, la mayoría de las emisiones de televisión ocupaban canales de 6 MHz en Japón y EE.UU., y de 8 MHz en Europa. Pero haciendo uso de la radiodifusión directa desde el satélite a las antenas de recepción domésticas de los espectadores era posible utilizar canales de 12 MHz, con lo que ya no había que extremar tanto la compresión de las señales de vídeo. A cambio de ello, los investigadores japoneses abandonaron todas las esperanzas de poder recibir las señales de alta definición, con un contenido de información tan denso, como señales de definición normal en receptores convencionales. Para empezar, el formato de transmisión ya no se parecía en absoluto a los formatos existentes, y además la reconstrucción de las imágenes a partir de las señales comprimidas hubiera



requerido una complicada electrónica de procesamiento de señal y memorias. Por ello la compatibilidad, otro de los puntos claves del paso a TVAD, fue desechada.

Para hacer frente al sistema japonés, los europeos eligieron una solución viable, basada en una norma llamada MAC en la que habían estado trabajando investigadores británicos, de la Independent Broadcasting Authority. Adoptar, como la norma MUSE, la multiplexión de los componentes analógicos de la señal de vídeo comprimida, acompañada de canales de sonido digitalizado y de trenes de datos que indican al receptor cómo tiene que reconstruir la imagen. La anchura de banda de base requerida es del orden de 12 MHz, por lo que también tiene que emitirse por radiodifusión vía satélite. Pero desde un principio se insistió en que la norma MAC había de ser compatible con las normas europeas convencionales de transmisión de televisión.

El reto de la compatibilidad

Las actuales transmisiones de televisión en Europa utilizan la norma PAL o la norma SECAM, ambas caracterizadas por una definición de 625 líneas de imagen que se exploran de un modo entrelazado 2:1 (por líneas alternadas), a razón de 50 tramas por segundo. Cada imagen completa se compone de dos tramas consecutivas, por lo que la frecuencia de imagen o de cuadro es de 25 por segundo. En cambio, en EE.UU. y Japón se sigue la norma NTSC, que ofrece imágenes de 525 líneas a razón de 60 tramas por segundo.

Cuando apareció la televisión en color, primero en Estados Unidos y luego en Europa, fue un requisito obligatorio hacerla compatible con el antiguo sistema en blanco y negro, de modo que el mismo programa pudiera ser captado en unos y otros televisores. Esto se consiguió componiendo la señal de crominancia con la de luminancia, aunque la separación final de ambas señales puede causar distorsiones a la imagen. En Europa, la compatibilidad con el blanco y negro fue todavía mejor resuelta que en Estados Unidos, pues se había dejado disponible en el espectro una anchura de banda mayor, y, aunque en PAL y SECAM se transmitan igualmente señales analógicas compuestas, podían separarse con mayor precisión las señales de crominancia y luminancia.

Al planificar la TVAD para Europa, Eureka impuso la condición de su compatibilidad con las normas actuales PAL/SECAM, y el primer paso era que la transmisión de imagen fuese analógica. Otra medida eficaz consistió en transmitir la crominancia y la luminancia como señales analógicas separadas, multiplexadas junto con los canales de sonido (en alta finalidad) digitalizado y los datos sumplementarios para el procesamiento de la señal. Para ajustarse a los sistemas europeos, MAC había de transmitir con definición doble de la de PAL/SECAM, es decir, 1250 líneas, y la frecuencia tenía que ser la misma normalizada en Europa: 50 tramas/segundo correspondiendo a los 50 hertz de la red eléctrica. Por su parte, MUSE transmite 1125 líneas de imagen a una frecuencia de 60 tramas, igual que la de su actual norma NTSC y también dictada por los períodos de la corriente alterna en aquellos países. Tanto MAC como MUSE han adoptado el formato amplio de 16 × 9, y se apoyan en muchos principios similares, por lo que el espectador no debe percibir grandes diferencias entre unas y otras imágenes.

Los enredos de la familia MAC

Conseguir el acuerdo entre las diversas naciones europeas en cuanto a la adaptación de una norma MAC única ha llevado su tiempo. Han tenido que superarse barreras idiomáticas y recelos nacionalistas en aras del interés común europeo. Tras rechazar algo así como una docena de propuestas, por fin se convino en establecer dos etapas en la evolución. En una primera fase, los fabricantes lanzarían equipos diseñados con arreglo a una norma precursora de la alta definición que se denominaría D2-MAC, la cual respetaría todavía la definición de 625 líneas pero adoptando ya los demás principios básicos MAC, incluso la nueva relación de aspecto 16 × 9, con lo cual los usuarios podrían ver imágenes de mejor calidad que las convencionales PAL/SECAM. En un segundo paso, al cabo de pocos años, los fabricantes producirían ya equipos de alta definición auténticos (HD-MAC, “high definition MAC”) a 1250 líneas. Los consumidores que hubiesen comprado receptores D2-MAC podrían optar entre ver los nuevos programas de alta definición pero con la menor resolución dada por D2-MAC, o bien adquirir un codificador HD-MAC adicional que les permitiese recibir unas imágenes más perfectas.

La estrategia señalada fue bien acogida por los fabricantes, que así podían introducirse paulatinamente en las técnicas avanzadas de la TVAD. Sin embargo, los consumidores y ciertas cadenas de televisión empezaron a preocuparse por la complejidad de tal proceso. Aquéllos se preguntaban cuántas cajas de decodificación iban a acumular en su sala de estar, y éstos se temían tener que comprar varias generaciones de equipos de estudio y decodificadores. En este ambiente, y favorecidos por el rápido desarrollo de la tecnología de transmisión por satélite, unos cuantos empresarios privados se lanzaron a la explotación directa de televisión por satélite en el sistema PAL, llegando a conquistar una considerable audiencia mundial. Tal situación inquietó a las cadenas de televisión nacionales, particularmente en Alemania, quienes reclamaron a la industria algún sistema para mejorar sus transmisiones sin tener que esperar a la implantación de MAC.

Los fabricantes europeos han atendido este llamamiento y han puesto a punto un sistema denominado PAL-plus, que promete, como D2-MAC, imágenes de mejor calidad y de formato 16 × 9 para los que adquieran un receptor de este nuevo tipo PAL-plus. El resultado de las demostraciones fue tan bueno que otros muchos fabricantes empezaron a preguntarse si valdría la pena seguir trabajando en preparar producción a gran escala de equipos D2-MAC, ante la posibilidad de que el interés de los consumidores haya sido absorbido por soluciones más rápidas y atractivas. Como afirma Peter J. Groenenboom, director de Philips Consumer Electronics, dejar a las "fuerzas del mercado libre" que seleccionen normas es sencillamente "una porquería". Por ello los productores importantes han tratado de forzar la situación solicitando a la Comisión Europea que establezca directivas o reglamentaciones en las cuales se exija a las transmisiones de televisión por satélite ajustarse a las normas MAC.

¿Saltarán los Estados Unidos a la cabeza de la TV digital?

En los años ochenta, cuando Europa elaboraba su plan para introducir televisión de alta definición y los japoneses construían ya prototipos de tales sistemas, los Estados Unidos se abstuvieron de participar en la liza. Ni las empresas quisieron sufrir nuevos reveses de parte oriental en este sector de la electrónica de consumo, ni el gobierno se prestó a promover lo que estimaba no ser más que una tecnología comercialmente atractiva.

Aquella decisión puede finalmente resultar acertada. Los Estados Unidos proyectan ahora pasar directamente a la tecnología digital en televisión, salto que les pondrá en vanguardia de las soluciones adoptadas por Europa y Japón para la TVAD. La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) va a seleccionar una nueva norma para radiodifusión de televisión a mediados de 1993. Cuatro de las seis propuestas que examina este organismo contemplan la transmisión digitalizada de imágenes; resulta, pues, muy probable que sea digital el sistema elegido para la nueva generación de TV en Estados Unidos. Ello responde a una motivación esencial: ha de mejorarse la calidad de las imágenes recibidas en un grado considerable frente al actual sistema NTSC. Pero, al mismo tiempo, los nuevos canales de TV digital han de acomodarse en la misma anchura de banda (6 MHz) que los existentes, sin interferirlos en absoluto.

Este último requisito, que parecía disuasorio, demostró ser viable merced a las técnicas de compresión de señal digital, y fue General Instrument en San Diego quien primero proclamó la posibilidad de utilizar canales de 6 MHz para transmitir imágenes digitalizadas, a razón de 1050 líneas por cuadro (alta definición). Esto disparó el interés por los sistemas digitales en todo el país, y pronto se sumaron otras empresas en las propuestas de sistemas digitales de TVAD. Se pudo apreciar que la transmisión digital ofrece una recepción igualmente nítida a todos los espectadores situados en su zona de cobertura, mientras que la recepción de señales analógicas sufre una degradación paulatina al acercarse al contorno de dicha zona; esta y otras ventajas de calidad se unen a la posibilidad de nuevos enfoques operativos, como por ejemplo que los propios espectadores manipulen las imágenes utilizando programas interactivos facilitados por la entidad emisora.

Las propuestas antes mencionadas serán sometidas a intensas pruebas en el año 93 en el Advanced Television Test Center, laboratorio federal financiado por la industria, tras lo cual la FCC elegirá el sistema que ofrezca mejor calidad de imagen.

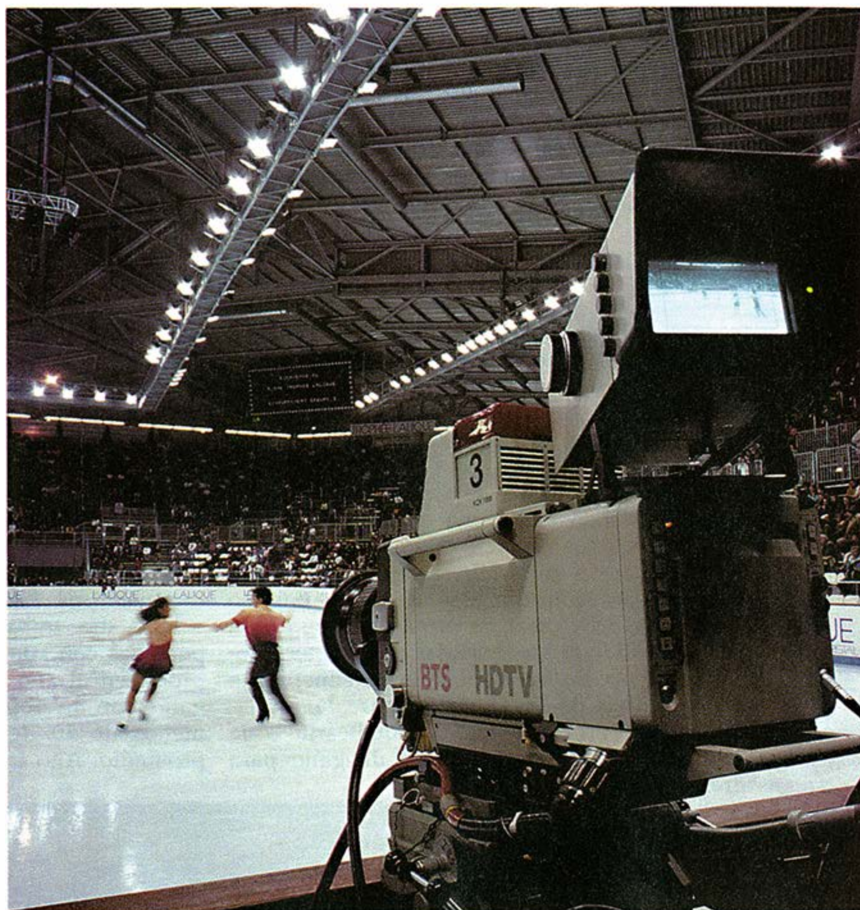
No hay duda de que la ola digital va a conmover toda la telecomunicación. Ni siquiera la radiodifusión terrenal se librará de su influjo. William Hassinger, de la FCC, afirma que los años noventa presenciarán una enorme transformación tecnológica.

Las transmisiones de televisión, radio, la telefonía móvil, e incluso la convencional, se están ya incorporando al vasto programa de digitalización, y las entidades responsables se aprestan a asumir su papel en la era digital que se avecina. "Todos van a querer hacer todo", dice Hassinger, "y se va a armar el lío."

Formatos de televisión que compiten

GRUPO	TIPO	LINEAS POR IMAGEN	PERIODO DE PRUEBA
Sarnof/ Philips/ Thomson/NBC	Analógico	525	Terminado
NHK	Analógico	1125	Terminado
General Instrument/ MIT	Digital	1050	Dic. 91- Ene. 92
Zenith Electronics/ AT&T	Digital	787,5	Feb. 92- Mar. 92
Sarnoff/ Philips/ Thomson/ NBC	Digital	1050	Abr. 92- Mayo 92
MIT/ General Instrument	Digital	787,5	Jun. 92- Jul. 92

Durante más de un año Pandolfi ha luchado por salir de este atolladero, convencido de la necesidad de apoyar a las empresas de alta tecnología pero obligado a atemperar sus propuestas con otros asuntos urgentes debatidos en la Comisión. La solución que propugnaba Pandolfi consistía en establecer una directiva sobre transmisiones por satélite que tuviese efecto desde el 1 de enero de 1992 y que diese a los fabricantes suficientes garantías sobre el futuro de los sistemas MAC para proseguir su desarrollo y producción, al tiempo que significara un estímulo para que las cadenas emisoras se adhiriesen a la norma MAC. Finalmente, el pasado diciembre, sus esfuerzos han dado un fruto: el consejo de ministros de la Comunidad ha acordado que las transmisiones en formato 16 × 9 han de utilizar la norma D2-MAC; las cadenas que actualmente transmiten en PAL o SECAM deberán transmitir simultáneamente en D2-MAC para 1995; cualquier servicio de alta definición que no sea "enteramente digital" deberá cumplir la norma HD-MAC. También podría la Comunidad Europea prestar apoyo económico a las emisiones en D2-MAC, aunque ello sea objeto de protesta por parte de Alemania.



3. MAS DE 40 CAMARAS DE ALTA DEFINICION, diseñadas dentro del programa Eureka, se han dedicado a grabar el desarrollo de la Olimpíada de Invierno de este año.

Tecnologías en juego: semiconductores y pantallas

El desarrollo de la televisión de alta definición en Europa requiere sin duda una sólida base tecnológica y unos medios de producción capaces de realizar los diseños avanzados que comporte el sistema. Dos elementos o productos básicos son dignos de una atención especial, y como tales los ha identificado el propio Pandolfi: las pastillas de semiconductores y las pantallas de los receptores de televisión.

Los fabricantes de circuitos integrados en Europa han mostrado cierta resistencia a acometer el diseño de circuitos integrados para el almacenamiento, procesamiento digital y otras funciones propias de la TVAD, en gran medida por la incertidumbre en cuanto al rendimiento de las elevadas inversiones necesarias. Desde 1985, la industria de los semiconductores se financia sus propios proyectos conjuntos, primero el Megaproject y luego el JESSI, y en consecuencia dispone ya, en palabras de Horst Fischer, primer ejecutivo del grupo de semiconductores Siemens en Munich, de la tecnología de memoria adecuada para almacenar las señales y de los diseños de procesadores digitales de señal necesarios para los decodificadores de televisión. Sin embargo, hasta que Fischer no se convenza de que los planes para establecer MAC encuentran eco en la industria, se resiste a embarcar a sus ingenieros en la realización de los complejos algoritmos MAC en procesadores de silicio.

También es motivo de preocupación el precario estado actual de la industria microelectrónica en Europa. Aunque la compañía Siemens en general tuviera beneficios el pasado año, su división de semiconductores acusó pérdidas, y a otras empresas les ha ido todavía peor. Philips consideró un éxito el Megaproject porque logró el objetivo de adquirir una tecnología propia, pero no quiso acometer la producción masiva de memorias RAM estáticas (SRAM), y una nueva fábrica que se había creado sólo para ese fin en Nimega se quedó en situación crítica.

Tal pesimismo proviene de experiencias de las largas horas dedicadas por un plantel de expertos ingenieros a diseños delicados y complejos, como el de nuevas pastillas o microcircuitos para sistemas digitales de televisión, que luego no se han atrevido a llevar a la práctica, temerosos de que otras soluciones no tan perfectas pero mejor comercializadas les cierren el acceso al mercado y sobrevengan las inevitables pérdidas financieras. Y como dice Fischer, "por mucho que valga tu gente, tu tecnología no tiene ningún valor si no obtienes ningún rendimiento de la inversión". En consecuencia, el ambiente general es de cautelosa espera.

Otro elemento importante de los antes señalados, y quizás el que más impresione a los futuros espectadores de TVAD, son unas nuevas pantallas planas para visualizar las imágenes de alta definición. Dichas pantallas, de más de un metro de altura, suponen abandonar la clásica solución de los tubos de rayos catódicos y buscar otra tecnología de visualización. Aunque puede recurrirse a multitud de soluciones imaginativas, numerosos expertos creen que la tecnología más próxima para la proyección en pantalla grande es la de los cristales líquidos. Dichos compuestos

son unas peculiares sustancias, no del todo cristales ni del todo líquidos, que tienen la propiedad de cambiar su orientación, y por lo tanto su capacidad de guiar luz polarizada, cuando se les somete a un campo eléctrico. Disponiendo estos materiales entre dos láminas de cristal se pueden construir pantallas visualizadoras de alta resolución, similares a las que llevan los ordenadores portátiles. Las pantallas de matriz activa contienen circuitos trazados por procedimientos litográficos.

La fabricación de tales pantallas de cristal líquido y matriz activa se ha revelado extremadamente difícil, y desde luego costosa, hasta para los colosos de la industria japonesa de semiconductores (Japón ha comprometido el equivalente a más de

Hacer negocio, átomo tras átomo

En la franja sur de París, una minúscula empresa con el sugerente nombre de Picogiga produce componentes que probablemente van a trabajar en las entrañas de casi un tercio de los receptores domésticos de TV por satélite, no sólo en Europa sino en Japón. Sin embargo, antes de alcanzar su destino final europeo, estos especiales compuestos semiconductores deben hacer una escala en Japón.

Hace unos seis años Linh T. Nuyen, jefe de un grupo de investigación en el laboratorio de Thomson CSF, tomó una decisión insólita: dejar un empleo sólidamente asentado y crear su propia empresa para proseguir y profundizar sus trabajos en alta tecnología. Así lo hizo, no sin antes obtener el beneplácito del primer ejecutivo de la Thomson para la fundación de Picogiga, empresa que se dedicaría a la producción de sustratos de arseniuro de galio para transistores y láseres de alta velocidad.

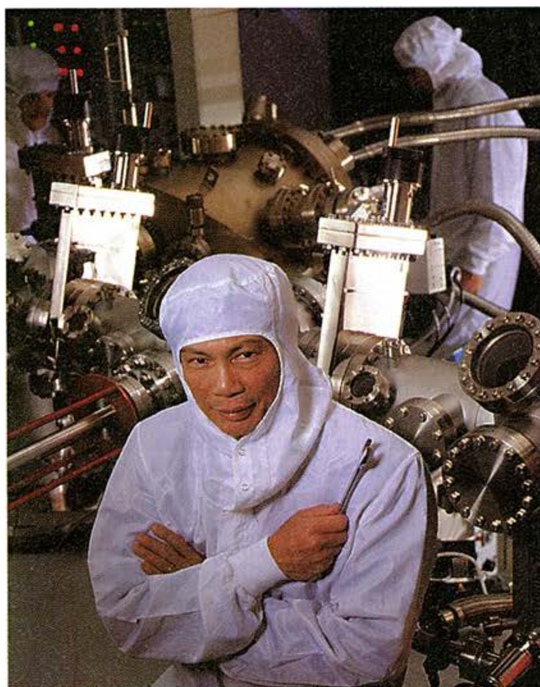
Nuyen se había dedicado, con su equipo de investigadores de Thomson, a investigar la formación de estructuras exóticas de semiconductores; le interesaba una técnica inventada por los laboratorios Bell de AT&T para el manejo de capas de átomos sumamente finas: la epitaxia de haz molecular ("molecular-beam epitaxy", MBE), que consiste en hacer crecer artificialmente capas de materiales diferentes, con unos pocos átomos de espesor, sobre una oblea de sustrato colocada dentro de una cámara de alto vacío. El equipo de Nuyen había trabajado cuidadosamente sobre la estructura cristalina de los semiconductores, llegando por fin a producir la primera serie de HEMT (transistores de alta movilidad electrónica), dispositivos de enorme rapidez. El éxito alcanzado fue tan sorprendente que los Bell se resistían a admitirlo. Ese fue el momento en que Nuyen, confiado en su capacidad y dominio de la técnica, decidió establecerse por su cuenta. A ello le ayudó su mentalidad emprendedora, como vietnamita que desde la infancia se había abierto camino en Francia.

Ya en su nueva empresa, Nuyen y su colega Jean François Rochette (también procedente de Thomson) consiguieron, al cabo de 18 meses, reunir dinero suficiente para comprar una máquina de MBE y contratar algunos técnicos. Su primer cliente lo encontraron precisamente en Japón, donde se estaba diseñando el sistema nacional de TVAD basado en la radiodifusión directa por satélite. En ese sistema se necesitaban antenas receptoras compactas y de alta sensibilidad, y para ello fue ideal la extrema sensibilidad de los transistores de arseniuro de galio que Nuyen fabricaba. Los japoneses, inquisitivos y desconfiados, acabaron persuadidos de la calidad de la oferta y la aceptaron, con lo que se inició la expansión de Picogiga.

Hoy día trabajan en la empresa de Nuyen 39 personas con cuatro máquinas MBE, y en tres turnos producen al año unas 10.000 obleas de arseniuro de galio, con un dopado especial. Su calidad es elevada: menos de 10 defectos por centímetro cuadrado en promedio. Año tras año han ido aumentando el rigor de sus estándares, buscando un compromiso entre el número de defectos admisible y el número de obleas que han de desecharse. Como dice Nuyen, "podemos aceptar un rendimiento de producción del 75 % en términos financieros. Nos gustaría que fuese el 95 %, pero entonces tendríamos que rebajar las restricciones de nuestro estándar de calidad."

La captación de clientes europeos todavía es difícil, reconoce Nuyen. Los fabricantes establecidos no suelen confiar en empresas que comienzan, por temor a que fallen inesperadamente. Por si fuera poco, hasta ahora no hay muchos fabricantes de microelectrónica en Europa que hagan uso masivo de materiales especiales como el arseniuro de galio. A Nuyen le preocupa la escasa agresividad de las industrias microelectrónicas europeas cuando las compara con las japonesas, que son "tigres que intentan devorarse unos a otros."

Gran parte de los materiales producidos en Picogiga vuelven a Europa, una vez convertidos por los japoneses en transistores que los fabricantes europeos, como Marconi y Nokia, utilizan en sus antenas parabólicas. Al mismo tiempo, Nuyen no pierde de vista otros nuevos mercados que demandan electrónica más ligera y compacta, como pueden ser los teléfonos portátiles.



LINH T. NUYEN es un empresario francés de origen vietnamita que fabrica obleas de arseniuro de galio para las antenas de satélite.

2000 millones de dólares en esta tecnología, y todavía tiene que soportar bajos rendimientos de producción). Incluso las pantallas de proyección, que utilizan como moduladores de la luz elementos de cristal líquido mucho más pequeños, han resultado ser delicadas y complejas. De ahí que las empresas europeas y americanas no se hayan lanzado abiertamente a producir grandes pantallas planas de cristal líquido.

Es probable que Europa guarde una baza importante en esta partida entablada sobre los cristales líquidos. La casa Merck, establecida desde hace 160 años en Darmstadt, presume justificadamente de poseer, más bien podría decirse atesorar, en su laboratorio de investigación, la mayor colección de compuestos de cristal líquido del mundo entero: más de 5000 sustancias diferentes. Como puede suponerse, Merck dispone de una base de datos informatizada donde se reseñan las características de todos esos compuestos y los resultados de un número elevadísimo de experimentos y mezclas realizados con ellos. Sin duda, existe ahí una base tecnológica formidable para acometer el diseño primario —en su mayor parte informatizado— de las deseadas pantallas planas.

La otra cara de la moneda es que Merck, pese a su naturaleza europea, tiene sus mejores clientes en el Extremo Oriente, precisamente en los fabricantes de visualizadores y pantallas, y de ningún modo quiere entrar en competencia con ellos pasando a producir pantallas. Sin embargo, Merck estima que la solución sería buscar nuevamente el apoyo de la Comisión Europea y los fondos aportados por los gobiernos nacionales para lanzar otro gran proyecto que cubriría la producción de pantallas planas de cristal líquido.

A finales de 1991 Philips anunciaba su intención de construir en Eindhoven una factoría dedicada a la fabricación de pantallas de cristal líquido y matriz activa. Hay quien sostiene que las empresas estadounidenses podrían estar interesadas en asociarse a un proyecto de este género, dado que allá existe un gran mercado de tales pantallas, pero las empresas no consiguen allegar fondos para construir una planta de producción masiva. Georg Weber, jefe del departamento de investigación en cristales líquidos de Merck, afirma con cierta ironía que un proyecto así sería el resultado de una decisión política, del tipo del Airbus, que "es un bonito avión, pero cuesta mucho dinero a los contribuyentes".

El futuro es digital

En el momento actual quizá lo más preocupante para los empresarios europeos comprometidos en el lanzamiento de la TVAD sea que su obra pueda verse —a medio plazo— barrida precisamente por aquella tecnología cuyo desarrollo sacrificaron para alumbrar el producto MAC. La televisión digital, es decir, aquella que utiliza una expresión puramente numérica (serie de bits) de todas las señales involucradas en sus diferentes procesos, desde la toma directa de imágenes del mundo real hasta su presentación visual en el televisor del espectador, acabará sin duda imponiéndose. Para ello cuenta con ventajas esenciales: el tratamiento digital abre un camino para superar las históricas diferencias de la frecuencia de trama, y además permite establecer una relación mucho más íntima con servicios esenciales de telecomunicación, así como acceder a sistemas informatizados, de entretenimientos, educación y todo un largo etcétera.

Se comprenderá, no obstante, que la industria de televisión europea persevere en su alineación con el proyecto MAC, a cuyo desarrollo se ha consagrado durante largos años, e igualmente mantengan su apoyo las grandes compañías nacionales de radiodifusión y de televisión. Se ha reanudado la investigación sobre la transmisión digital de televisión, que por otra parte sólo podrá considerarse "de alta definición" cuando cumpla el requisito básico de ofrecer una resolución vertical y horizontal de la imagen que sea el doble que en los sistemas convencionales. En una reunión convocada por el CCIR en Ginebra, el pasado noviembre, se examinaron trabajos y propuestas sobre TVAD para estudios, interfaces de señales de vídeo digitales y, especialmente, técnicas de transmisión digital de televisión (incluso la TVAD) por redes terrenales.

Este vivo interés ha calado en las administraciones y empresas. La BBC ha incorporado sonido digital a numerosos programas de televisión, y sus técnicos, junto con los de la RAI italiana, han probado sistemas de transmisión digital de vídeo con pleno éxito, colaborando ahora en el desarrollo de un proyecto de investigación europeo dedicado a esta materia.

Maurizio Ardito, del Centro de investigación de la RAI en Turín, confiesa que están apoyando la estrategia del proyecto Eureka, pero que "en cuanto se haya adoptado MAC, debe pensarse en la transmisión digital. Técnicamente estamos muy seguros de que el futuro es digital". Los investigadores de la BBC esperan que la generación europea de televisión digital esté preparada hacia 1997.

Los técnicos de la Sveriges Television, en Estocolmo, se muestran aún más impacientes, particularmente por disponer de un servicio digital por la red terrenal. (En Suecia se utilizan mucho más las redes de cable y radio terrenales que los satélites.) No son muy entusiastas de la TVAD, y se han dedicado a experimentar nuevos algoritmos para la transmisión terrenal de señales digitales. Como todavía no pertenecen a la Comunidad Europea, los suecos no se han visto realmente involucrados en el proyecto MAC.

De cualquier modo, el proyecto Eureka está logrando sus objetivos, y Europa tiene ya en su mano un sistema de TVAD recién nacido; como primer paso hacia el consumidor, Thomson y otras empresas han puesto en el mercado televisores avanzados, aunque todavía no de alta definición: el "Space System" de Thomson puede recibir y visualizar señales PAL y D2-MAC, así como las emisiones olímpicas en HD-MAC (con calidad D2-MAC solamente) en un tubo de rayos catódicos de 93 centímetros. Un televisor de estas características puede costar unas 700.000 pesetas. Tanto Thomson como Philips han construido prototipos para presenciar en HD-MAC verdadera los juegos olímpicos, desde las salas de exhibición, pero todavía queda un año o dos para que el público pueda encontrar estos equipos en la tienda. Aun así, el esfuerzo común suscitado por el proyecto comunitario Eureka ha demostrado la capacidad de sus técnicos y directivos para encontrar alternativas en un dominio que ya parecía pertenecer a la industria japonesa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIGITAL TELEVISION. Dirigido por C. P. Sandbank. John Wiley & Sons, 1990.

FUNDAMENTALS OF ELECTRONIC IMAGING SYSTEMS: SOME ASPECTS OF IMAGE PROCESSING. William F. Schreiber. Springer-Verlag, 1991.

PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON HDTV AND BEYOND, 4-6 September 1991, Turin, Italy. Financiado por Istituto Internazionale delle Comunicazioni, Génova, Italia.

HIGH DEFINITION TELEVISION: PROGRESS AND PROSPECTS: A MATURING TECHNOLOGYIN SEARCHOF A MARKET. Economist Intelligence Unit, Special Report n.º 2189, octubre de 1991.

Ciencia y empresa

Silicio encantado

¿Luz en pastillas?

Las pastillas de silicio ("chips") que emiten luz en respuesta a un estímulo eléctrico (y no óptico) podrían, en teoría, sellar el matrimonio de la óptica con la electrónica y crear una familia de nuevas generaciones de conmutadores relámpago y otros componentes para telecomunicaciones y ordenadores. No suenan todavía las campanas nupciales, pero se percibe con toda nitidez la llegada del silicio poroso.

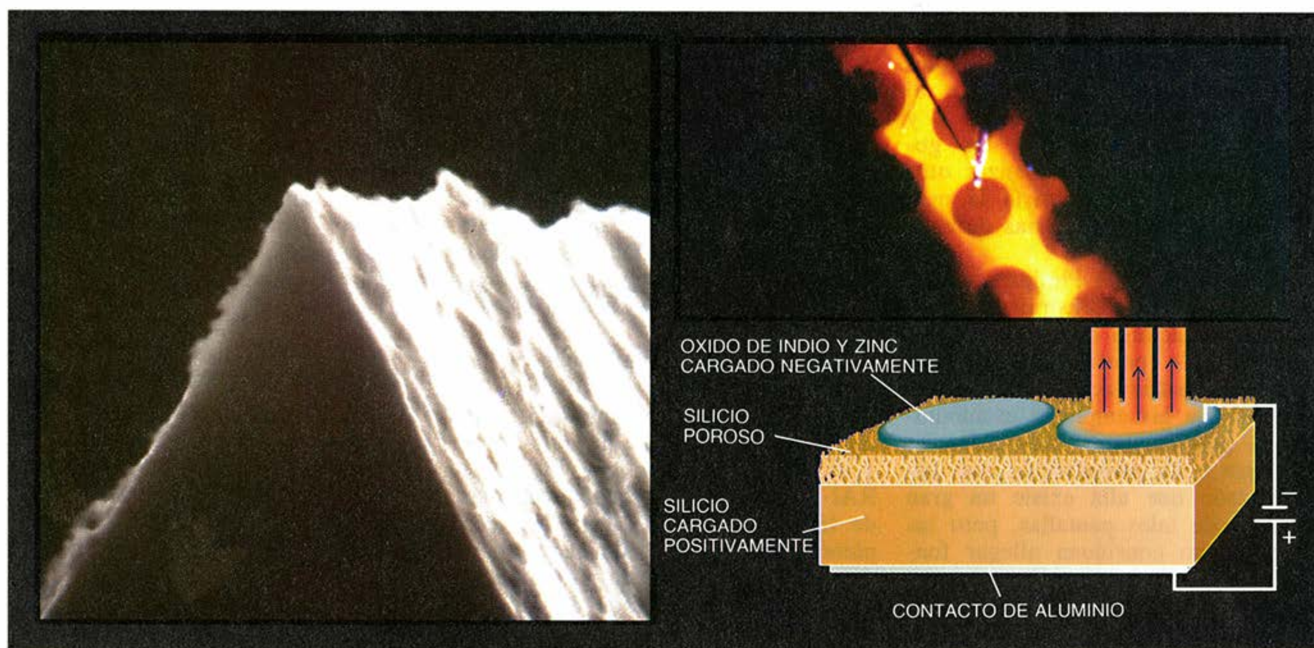
El silicio emisor de luz salió a la palestra en el último congreso de la Sociedad de Investigación de Materiales (MRS), el año pasado. Leigh T. Canham y sus colegas, de la Oficina de Investigación de la Defensa en Great Malvern, Inglaterra, sostuvieron allí que las obleas de silicio, reducidas a estructuras afiladas de unas decenas de angstroms de anchura mediante un baño de ácido fluorhídrico y excitadas por la luz, emitían luminiscencia en cierta gama de colores. La comunicación planteó muchas más preguntas que respuestas aportó. Los británicos afirmaron también haber creado obleas capaces de emitir electroluminiscencia (emisoras de luz si se excitaban mediante electricidad), pero suministraron pocas pruebas. Y no pasaron de la especulación cuando se les solicitó la razón de que el silicio fuera capaz de dar luz.

El debate ha ido ganando fuerza con los meses. En una reunión de la MRS posterior al congreso, el Instituto de Tecnología del Estado Sólido de Munich y la Universidad de Agricultura y Tecnología de Tokio presentaron pruebas de electroluminiscencia. Por su parte, las empresas IBM y Spire expusieron la fabricación de diodos de silicio que actuaban como diodos emisores de luz. Pero no es fácil fabricar esos dispositivos: hay que crear emparedados de capas cargadas positiva y negativamente de silicio y silicio poroso y después superponer un contacto eléctrico sin dañar el material.

Extrapolando de su trabajo en células fotovoltaicas, los expertos de Spire añadieron una capa cargada negativamente de óxido de indio y zinc (ITO) encima del silicio poroso. El ITO es transparente a la luz visible; por tanto, aplicaron una tensión y percibieron una luz anaranjada que salía de la parte superior del dispositivo. Los expertos de IBM construyeron un diodo más tradicional que emitía luz desde el borde. Rodearon el silicio poroso de capas de silicio convencional cargadas negativa y positivamente, y después grabaron el material.

A efectos prácticos, no basta con que el silicio poroso transforme la electricidad en luz; debe hacerlo de manera rentable. Pero ningún experto quiere pronunciarse sobre los rendimientos que haya logrado. El material de Namavar, por ejemplo, necesita unos 10 volts para producir luz "visible". Eso dice mientras confía rebajar el voltaje preciso a dos volts mejorando los contactos.

Trabajo experimental aparte, no existe una explicación racional del comportamiento insólito del silicio poroso. De acuerdo con la hipótesis que capitanea Canham, el silicio poroso estaría formado por "cables cuánticos", estructuras que confinan los movimientos de los electrones a una dimensión, con lo que favorecen la recombinación de electrones y cargas positivas. Esas recombinaciones producirían la luz. Por contra, los físicos del Instituto Max Planck de Investigación del Estado Sólido de Stuttgart atribuyen la fotoluminiscencia al siloxeno, compuesto de silicio, oxígeno e hidrógeno. El siloxeno se ca-



1. ENTRE LOS SEMICONDUCTORES INSOLITOS de emisión de luz hemos de citar el germanio (izquierda), *esculpido en forma de "alambres cuánticos" por investigadores del Instituto del Triángulo de Investigación. El silicio poroso, fabricado por la compañía Spire, también se ilumina cuando es excitado por luz ultravioleta* (arriba, derecha). *Para hacer que el silicio emita luminiscencia por medio de electricidad, se construyó un diodo* (abajo, derecha). *La luz visible del silicio poroso brilla a través de las tapas de óxido de indio y zinc.*

racteriza por las propiedades que asociamos hoy al silicio poroso. Se acaba de demostrar que la superposición de siloxeno sobre silicio cristalino (con una capa intermedia de disiliciuro de calcio) emitía también luminiscencia; y se supone que ese material se dejaría manipular mucho mejor que el quebradizo silicio poroso.

El grupo de Rama Venkatasubramanian, del Instituto del Triángulo de Investigación, en Carolina del Norte, decidió abordar la cuestión desde otro frente. "Si el efecto era válido en el silicio, pensaron, debería poder reproducirse en otros semiconductores." Para someter a prueba esa condición, recurrieron a la fotolitografía, técnica de alta precisión que se emplea para grabar en germanio cables cuánticos.

En la Reunión Internacional de Dispositivos Electrónicos, de diciembre de 1991, el grupo del Triángulo hizo público que, excitado con luz, el germanio emitía una luminiscencia rojiza. Pero ni siquiera esos resultados apuntan concluyentemente a un efecto cuántico; queda todavía allí flúor que podría causar la luminiscencia.

Tampoco acaba de entenderse la paradoja de que esas técnicas de grabado no hayan producido silicio emisor de luz y sí lo ha hecho el tratamiento con ácido fluorhídrico, menos controlado. Venkatasubramanian ve la explicación en las diferencias entre las estructuras electrónicas (o intervalo de banda) del silicio y el germanio. Confía, sin embargo, en que, si consigue que el germanio emita luminiscencia con electricidad, dé con el método para lograr idéntico resultado con el silicio.

Por último, sabido es que el silicio ópticamente excitado emite una gama amplia de colores; la gama del silicio eléctricamente excitado es todavía menor. Canham ha apreciado colores anaranjados y amarillos en sus experimentos de electroluminiscencia, pero no verde.



2. *INSECTICIDAS INCORPORADOS protegen el algodón transgénico* (a la izquierda), *mientras que una planta normal* (a la derecha) *es víctima de las plagas. Foto: Monsanto.*

Lucha contra las plagas

El mejor pesticida: la gestión inteligente

Por su endiablada tendencia a domeñar, en pocas temporadas, la fuerza de los insecticidas, las plagas han hecho bueno el refrán del campo que reza: "producto que gastas, producto que malgastas". De ahí el esfuerzo de la industria biotecnológica y los ecólogos por adelantarse a la adaptación de los insectos a un importante grupo de insecticidas basado en toxinas bacterianas de *Bacillus thuringiensis* (*Bt*).

Desde los años cincuenta, los labradores tiraban a voleo esporas de *Bt* por los sembrados para evitar los insectos. A diferencia de los insecticidas químicos de amplio espectro, las toxinas de las esporas resultan letales para escarabajos, moscas y mariposas, plagas habituales en el campo. Pero ni otros insectos, ni los humanos, se resentían de la presencia del *Bt*, lo que le convertía en insecticida ideal, seguro y escasamente agresivo. El *Bt*, sin embargo, presenta un inconveniente. Debe aplicarse con una frecuencia mucho mayor que los insecticidas químicos.

Según los cálculos, el *Bt* y otros bioinsecticidas no suponen, pues, ni el 1 por ciento del mercado de insecticidas agrícolas. La industria ha trabajado en la síntesis de nuevos productos que duran más que sus predecesores o refuerzan su concentración de toxinas. No obstante, cuanto más efectivos se hacen los productos *Bt*, tanto más aumentan la presión sobre los insectos para que se adapten. A mediados de los años ochenta, se acometieron ensayos de laboratorio en los que se hizo patente que el escarabajo de la patata y el gusano del tabaco habían adquirido el potencial genético necesario para resistir la acción del *Bt* en determinadas condiciones. El problema salió de su recinto académico cuando Brusce Tabashnik, de la Universidad de Hawai en Manoa, descubrió que una población de mariposas del diamante que cazaba en un campo de berzas en Hawai había duplicado su resistencia al *Bt* entre 1986 y 1989.

Las mariposas de Hawai y otro grupo en Florida son los dos casos documentados comprobados de resistencia adquirida al *Bt*, pero existe el temor de que no sean los únicos. Si proliferan, habría que volver a los insecticidas químicos.

Para mantener el nivel de eficacia del *Bt* es buena cosa variar la mezcla microbiana fumigada sobre los cultivos. Las diferentes cepas de bacterias *Bt* producen combinaciones distintas de toxinas, lo que significa que los insectos resistentes a una pueden ser vulnerables a las demás. Pero cabe que hubiera pocos grupos de toxinas a los que recurrir, aun cuando existan miles de cepas diferentes.

La investigación ha abordado también la inserción de genes de *Bt* en las plantas, o sus bacterias simbióticas. Tales cosechas transgénicas sintetizarían y concentrarían las toxinas en sus propios tejidos. El algodón transgénico, que Monsanto espera comercializar de aquí a cinco años, será probablemente la primera planta equipada con *Bt*. La patata y otros cultivos podrían seguirle.

Para contrarrestar la presión de resistencia en plantas transgénicas convendría crear refugios para los insectos susceptibles a *Bt* sembrando algunas matas normales entre las transgénicas. Los insectos susceptibles vivirían de las plantas, pero también se alimentarían de sus compañeros más resistentes. Si la resistencia a la *Bt* es un carácter genético

recesivo, como apuntan los estudios provisionales, la descedencia inmediata de los insectos sería, en buena parte, vulnerable al *Bt*.

Se ha hablado también de alterar la expresión de los genes *Bt* en las plantas transgénicas, de suerte que sólo se mostraran activos en ciertos tejidos, durantes períodos críticos del crecimiento de la planta o en respuesta a desencadenantes químicos aplicados por los agricultores. Semejante regulación de las toxinas *Bt* reduciría la presión de resistencia. El inconveniente estriba en nuestro magro conocimiento de la genética de las plantas de cultivo, que retrasa diez años por lo menos la viabilidad de ese enfoque. La responsabilidad de la gestión de la resistencia recaerá en último término sobre los agricultores; a ellos competirá decidir si usar los productos *Bt*, y cómo emplearlos.

Lo que los agricultores, investigadores e industria están demandando es una información más sólida sobre eficacia y consecuencias de la aplicación de distintos métodos, aislados o en combinación. Podría emplearse *Bt* como un componente más de la gestión integrada de plagas, en la que los agricultores contasen tanto con los plaguicidas como con los predadores naturales para controlar los insectos. No hemos de empecinarnos en matar todo bicho viviente; algunos insectos se convierten en plagas sólo cuando su número supera cierto umbral.

Resistencia del aire

La aerodinámica ataca una de sus últimas fronteras

La corriente de aire que fluye junto a las alas de un reactor comercial se puede fácilmente convertir en un turbulento remolino que frena el avance y dispara el consumo de combustible. Los ingenieros aeronáuticos de ambos lados del Atlántico están apresurándose a equipar las alas con elementos semejantes a los aspiradores domésticos, que previenen la aparición de esas violentas corrientes.

El beneficio para la empresa aeronáutica cuyos aparatos incorporasen en sus alas el control de la corriente laminar podría ser enorme: podríamos diseñar aviones de estructura más ligera y motor más pequeño. El ahorro de combustible, amén de su benéfica repercusión económica, reduce la cantidad de óxidos de nitrógeno y otros productos secundarios y nocivos de la combustión.

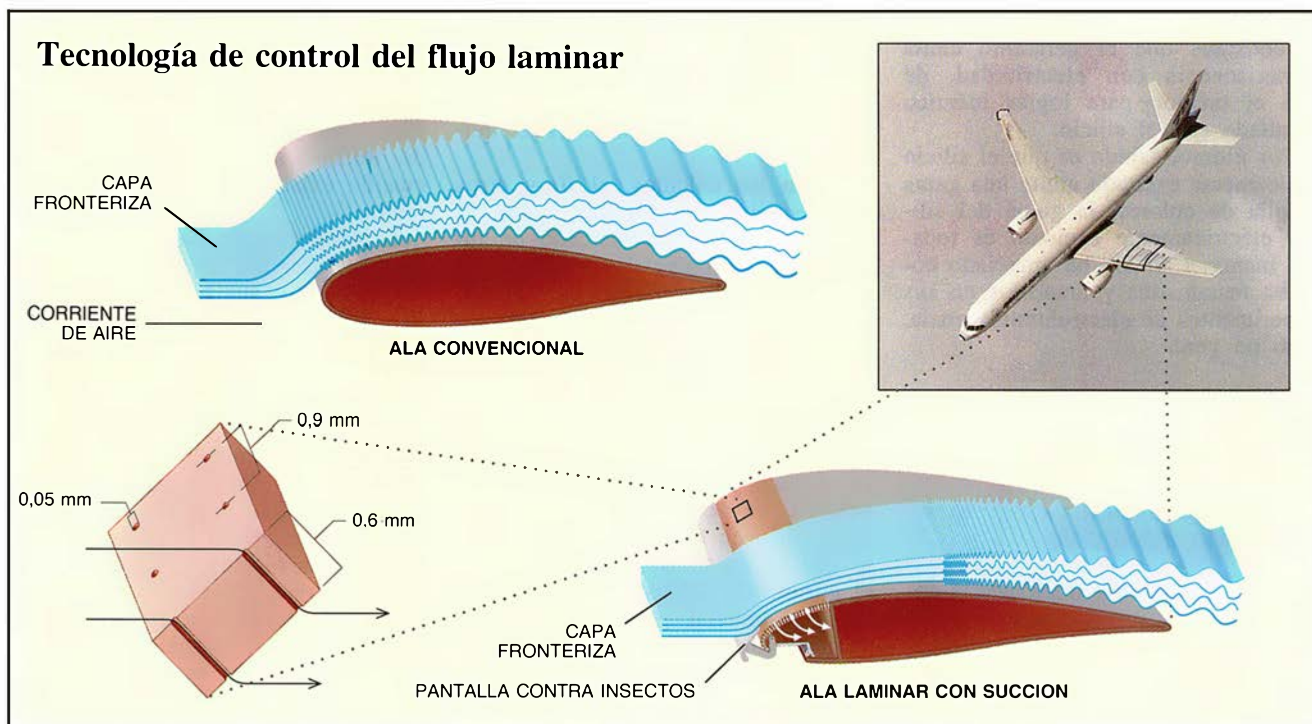
La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) estima que una caída del rozamiento del uno por ciento en toda la flota aérea comercial de los EE.UU. produciría 100 millones de dólares en ahorro de combustible. El control de la corriente laminar podría reducir la resistencia hasta en un 20 por ciento.

En ningún otro aspecto de la innovación aérea se logra un beneficio económico similar. El moderno reactor comercial ha mantenido invariable su forma desde los años cincuenta, tal era el acierto de su línea aerodinámica. Para la empresa europea Airbus y la americana Boeing se trata de lo último realmente importante que queda por hacer en la aerodinámica de los aviones.

El objetivo: preservar en orden e íntegra la capa fronteriza, capa de corrientes aéreas que fluyen junto al avión a distintas velocidades y a distancias de hasta un cuarto de centímetro del mismo. Las cabezas de los remaches, el polvo, la suciedad y el ruido de los motores convierten esos estratos de corrientes de movimiento ordenado en un torrente caótico.

Los aviones pequeños retienen mejor el deslizamiento laminar merced a la menor longitud de sus superficies de vuelo y gracias también a sus alas, casi perpendiculares al fuselaje. Basta con dar la forma adecuada y pulir las alas y otras superficies de esos aviones para retener las capas lisas y estratificadas de flujo laminar. Los aviones grandes —de 100 o más asientos— necesitan tanto alteraciones en las alas como un sistema de succión que aspire aire hacia el interior del ala a través de un millón de diminutos orificios, lo que impide la turbulencia.

Los ensayos experimentales para retener la corriente laminar se remontan ya medio siglo, pero las dificultades de fabricar y mantener un ala laminar han ido retrasando su desarrollo. El primer sistema de succión para grandes aviones de línea



voló en 1990 y 1991, dentro de un plan conjunto entre la NASA, la compañía Boeing y la Fuerza Aérea de los EE.UU. Con láseres se abrieron millones de perforaciones de unos 0,05 milímetros de diámetro en un panel de titanio que se había aplicado en la superficie superior del ala izquierda de un avión Boeing 757. Se instaló en el interior del ala un sistema de tuberías para los agujeros y se colocó una bomba en el soporte del motor.

Pulida y pintada el ala, se extendió sobre el borde de ataque una pantalla metálica durante los aterrizajes y despegues para evitar que los insectos obturasen los orificios. Aunque el panel del 757 cubría solamente el 15 por ciento delantero del ala, las lecturas de los sensores mostraron que el flujo laminar se extendía hacia atrás, hasta más de las dos terceras partes de la superficie superior.

Los funcionarios de Airbus reconocen que los vuelos de prueba de la NASA han establecido una clara ventaja, de años, para la aeronáutica norteamericana. Pero Airbus no ha tirado la toalla. En esa pugna de innovación tecnológica, la NASA ha impuesto el secreto sobre los programas de prueba.

Hasta ahora, los ensayos europeos de tecnología laminar se han limitado a aviones pequeños. Airbus tiene en proyecto montar un sistema de succión en la cola para determinar si los tubos y otras servidumbres dificultan las operaciones de mantenimiento; se propone, asimismo, ensayar el fenómeno de la succión en un ala. Y todo ello protegiendo con mil llaves sus secretos. De lo que se desprende la importancia decisiva, para la navegación aérea americana y europea, de la posesión de esa técnica. Pide la NASA cinco años más de trabajo antes de instalar los prototipos en los nuevos aviones. Habrá que resolver, por ejemplo, cómo conservar abiertos los microagujeros y limpia la superficie.

Las compañías están explorando las posibilidades de otro método menos caro —y menos eficaz— de reducir la resistencia: cubrir las superficies del avión con una especie de traje de piel de tiburón. Durante años, las compañías aéreas han estado ensayando una cinta fabricada por la empresa 3M, recorrida por crestas y surcos microcópicos. Como la áspera piel de un tiburón, esas diminutas nervaduras reducen la resistencia al avance causada por la turbulencia. Pero los resultados no admiten comparación: las nervaduras reducen la resistencia en un 2 por ciento. En cuanto aparece la turbulencia, sirven de leve paliativo sin conseguir devolver la capa fronteriza a su régimen laminar original. El mantenimiento constituye otro motivo de preocupación. A las compañías aéreas les resultaría engorroso tener que arrancar una cinta y volverla a aplicar cuidadosamente en cada inspección periódica. Nadie descarta las microcrestas; podrían aplicarse donde no sea viable la succión, por ejemplo sobre la mayor parte del fuselaje. Airbus, para empezar, las ha colocado en más del 70 por ciento de un avión de pruebas.

XXV Olimpíada

Circuitos ocultos

Dentro de unos meses se celebrarán en Barcelona los Juegos de la XXV Olimpiada. Durante los 16 días, un ejército de periodistas, comentaristas y técnicos de todas clases van a esforzarse por recoger, intercambiar y distribuir a los rincones más distantes la información "en caliente" sobre el desarrollo e incidencias de las distintas lizas.

Participarán más de 10.000 atletas en múltiples pruebas que se desarrollarán en instalaciones deportivas dispersas por varios lugares geográficos. A ellos hay que sumar un nutrido equipo de jueces, cronometradores y árbitros, más el numeroso personal implicado en la organización y los servicios. Todos ellos requieren capacidad de comunicarse, intercambiar datos, procesar informaciones, controlar resultados, y estas necesidades vienen a sumarse a las anteriormente señaladas de relación con el mundo exterior.

Es evidente que tal cúmulo de exigencias sólo puede ser atendido por redes y sistemas de telecomunicación e informática cuyo diseño y soporte tecnológico se ajuste a las particulares características de los acontecimientos olímpicos y a las necesidades de información del mundo de hoy. Sonidos, imágenes, textos y datos serán los vehículos de estas informaciones y habrán de ser transmitidos y recibidos en lugares diferentes y en el momento preciso, con gran movilidad cuando el caso lo requiera, y con todas las garantías de seguridad.

Se ha prestado especial atención a las áreas siguientes: *a*) *Gestión de los resultados*, que ofrece a jueces y árbitros medios para controlar y registrar resultados, elaborar resúmenes, clasificaciones y estadísticas, y difundir tal información a los asistentes a los recintos deportivos por medio de paneles y marcadores. La tecnología consiste en microordenadores distribuidos por los distintos locales de competición, en comunicación con un ordenador centralizado encargado de coordinar, procesar y distribuir la información recopilada. *b*) *Gestión de la información*, que cubre el acceso a bases de datos, a través de un servicio videotex (Ibertex en España). Aparte de este servicio, de carácter público, cabe citar como novedad otro servicio de tipo promocional y restringido: unos 3600 usuarios seleccionados entre medios informativos y personalidades destacadas de 50 países del mundo han recibido (en préstamo) un terminal de ordenador portátil que les permite acceder, a través de sus respectivas redes telefónicas nacionales y de una red de datos privada (ALCANET/INFONET), a una base de datos centralizada. Se incluye también en este apartado el correo electrónico.

En tercer lugar, o *c*), tenemos la *gestión de la seguridad*, que concierne a todas las operaciones orientadas a mantener un alto grado de seguridad en personas e instalaciones, utilizando circuitos especiales de cable y radiocomunicaciones para control y comunicación de incidencias, inspección de objetos, protección de accesos, vigilancia por circuito cerrado de televisión, etcétera. *d*) *Gestión de las telecomunicaciones*, sin duda el capítulo más variado, que abarca la arquitectura básica, sistemas y equipos, medios de acceso, equipos terminales, sistemas internos de radiocomunicaciones y red integrada de comunicaciones. Veamos uno por uno.

La arquitectura básica (la red olímpica) está integrada por las redes que soportan los servicios cuya necesidad se ha determinado: telefonía convencional y avanzada, transmisión de datos y textos, transmisión de radiotelevisión en ambos sentidos (contribución y distribución), radiocomunicaciones móviles. Se han definido y calculado todos los elementos de red, como son las centrales, vías de transmisión, equipos terminales, y se han establecido interfaces entre las distintas redes funcionales, disponiendo además las oportunas redes de reserva o alternativas.

Habrá sistemas y equipos capaces de prestar los servicios internos de transporte de información en sus diversas formas: señales de voz y acústicas, señales de datos e imágenes. La cobertura de estos servicios se extiende a todo el recinto olímpico. Se contará, asimismo, con medios de acceso a servicios de teleco-



3. LA TORRE DE MONTJUICH, con la de Collserola, desempeñarán un importante papel en las comunicaciones durante los Juegos Olímpicos. La torre de Montjuich (fotografía) *cumple un doble cometido, funcional y simbólico. Desde el punto de vista funcional, alberga los servicios, antenas y dispositivos de la telecomunicación; desde el punto de vista simbólico, la torre evoca el acontecimiento deportivo, al tiempo que presenta reminiscencias antropomórficas de figura oferente. Su forma singular no contradice las leyes de la estática, por cuanto el centro de gravedad de la base coincide con la resultante vertical del propio peso. La inclinación del fuste coincide con el ángulo del solsticio de verano en Barcelona y, a través de la plataforma circular de la base de escalinatas, se convierte la sombra de la torre sobre las mismas en reloj de sol. Su creador es el arquitecto Santiago Calatrava.*

municación de uso público (télex, teletex, telefax, datafax, TMA, etc.). Los usuarios dispondrán de equipos terminales adecuados para los servicios finales de telecomunicación que han de utilizarse, según criterios de nivel tecnológico (digital frente a analógico, por ejemplo), ergonomía, multifuncionalidad (terminales TEX-FAX, videoteléfono, etc.).

Entre los sistemas internos de radiocomunicaciones, citemos la posibilidad de la radiobúsqueda para transmitir avisos acústicos o mensajes escritos a los usuarios provistos de pequeños receptores, y la radiocomunicación móvil entre estaciones base, personas y vehículos. Pero tal vez la realización más destacada en el sector descrito sea la red integrada de comunicaciones voz/datos de altas prestaciones creada por Telefónica. Esta red se denomina "TIVIDABO'92" (Telefonía Integrada Veu y Dades Barcelona Olimpica 92), tiene capacidad para 8000 líneas integradas y cubre todos los recintos, sedes y centros de prensa, con instalaciones avanzadas y comunicaciones digitales de extremo a extremo.

La quinta área considerada, *e*), es la *gestión de la electrónica*, que comprende el equipamiento de sonorización de instalaciones olímpicas, medios auxiliares como los de traducción simultánea, la visualización (pantallas gigantes de vídeo, marcadores de estadio), los paneles informativos al público, el circuito cerrado de TV deportiva para uso exclusivo de jueces y árbitros, y por último los equipos de pista (cronometraje y medición) que permiten dar resultados con absoluta precisión e informar de ellos al público mediante marcadores de pista. *f*) *Cobertura de los medios de comunicación*, que atiende a la dotación de puestos integrados para comentaristas de radio y televisión desde los que tengan acceso selectivo a los 16 canales de TV producidos localmente, realicen entrevistas o comentarios con posible inserción en vivo o grabación, y se comuniquen libremente con su país de origen o cualquier otro interlocutor. También se ha previsto un puesto para prensa, dotado de facilidades telefónicas y monitor de TV que recoge imágenes del propio estadio. *g*) *Radiotelevisión olímpica* (*RTO*). La configuración adoptada consiste en un Centro RTO al cual afluyen a través de una red en estrella (red de contribución) 90 señales de vídeo procedentes de 37 recintos deportivos; dicho centro elabora con estas señales 16 programas (canales) de TV que se reparten por la red de distribución hacia la Villa Olímpica y otros puntos de interés en el área de Barcelona, más otros 4 canales de TV destinados a la Villa Olímpica de Bañolas, atendiendo así 40 centros distintos. Desde RTO se transmiten los programas al IBC (International Broadcasting Center); de aquí se envían en las condiciones adecuadas para acceder a la red de televisión nacional e internacional a través de la torre de Collserola, los radioenlaces de Retevisión y la estación terrestre de comunicaciones por satélite de Telefónica.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

El número de osculación

Martín P. Urdán dejó correr la mirada sobre las rojas arenas de Marte que se extendían del otro lado del ventanal. Siendo presidente de TeleMarte, podía permitirse el ventanal mayor y más costoso de toda Ciudad Sirtis, un ventanal superaislado para defenderse de la gelidez nocturna. Tan disgustado e irritado estaba Urdán, que sentía tentaciones de arrojar su butaca contra el cristal. La Central Nacional de Noticias, su gran rival, acababa de dar en primicia el descubrimiento de artefactos marcianos protohumanos. Y tal desastre era sólo la punta de un iceberg... ¡de dióxido de carbono!

Las cosas parecían mucho más sencillas cuando, pese a fuerte competencia, Urdán se había asegurado la exclusiva de la distribución de señales de televisión a las nuevas colonias marcianas. ¡Si no fuera por aquella condenada cláusula de eficacia! Su equipo jurídico le había asegurado que era inocua: sólo exigía que TeleMarte construyese un sistema de teledifusión más eficiente que el propuesto por sus competidores. Pero el Tribunal Supremo acababa de dictaminar que TeleMarte podría perder su exclusiva, aun después de concedida, si la competencia desarrollaba sistemas superiores al suyo. De darse el caso, TeleMarte se encontraría con graves problemas de tesorería y entonces... Bueno, más valía no pensarlo.

Se le fue la mano al interfono. “Cresida, que Ayuso y Salinas vengan enseguida.” Dirigió entonces la atención hacia un gran globo marciano que descansaba sobre su escritorio. La superficie del globo estaba recubierta por discos de plástico adhesivo, que cada poco volvía a repartir y recolocar. Harto y fastidiado, arrojó un disco a través del despacho, que fue, por accidente, a dar en Fernando Ayuso, recién entrado por la puerta.

“Imagino que estará usted disgustado por el informe de la CeNN sobre los artefactos”, dijo Ayuso, tragándose casi las palabras.

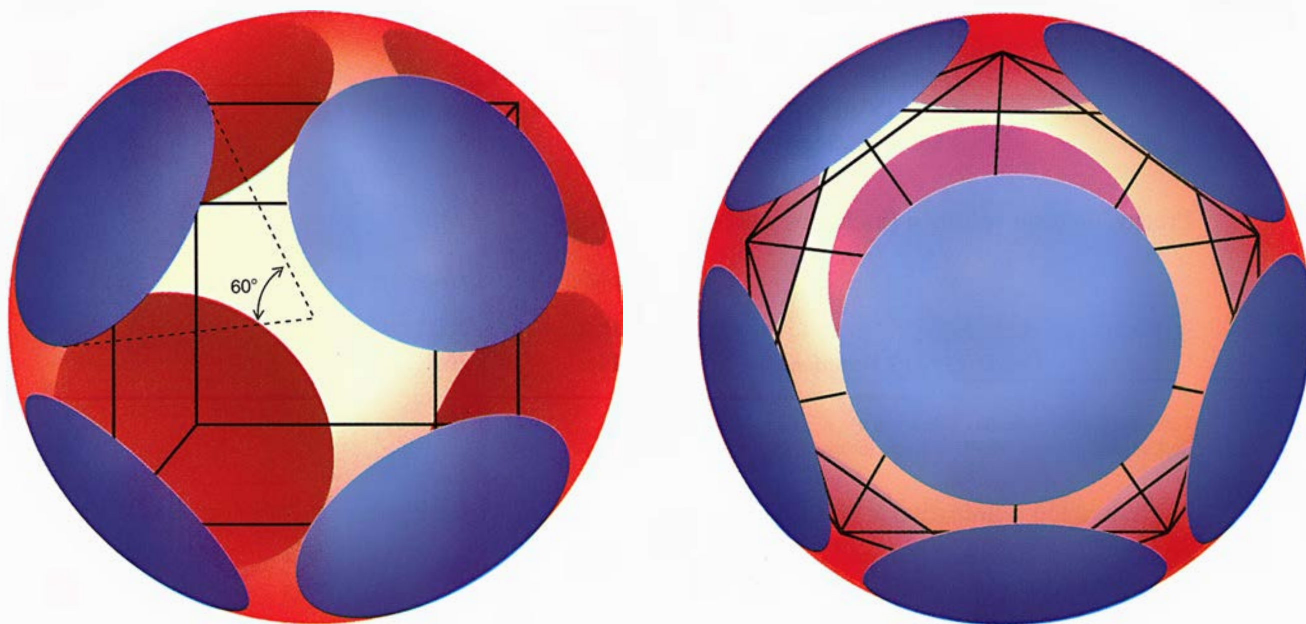
Urdán gruñó irritado. Ayuso, buen entendedor, cerró la boca y se dispuso a capear el temporal. Entonces se percató del globo marciano, enarcó las cejas en gesto perplejo y se sentó. “¿Qué pasa, Martín, otro plan de cobertura? Creía que la cuestión había quedado decidida hace meses. Ocho repetidores, cada uno en el vértice de un cubo imaginario.”

“Estaba decidida hace meses, Fernando, pero ahora nuestros planes no valen de nada, por obra y gracia del Tribunal Supremo. No basta con que ofrezcamos una cobertura superior a la que ofrecían los Satélites Repetidores de Phobos cuando contendieron con nosotros. Tenemos, sencillamente, que ofrecer la mejor de las coberturas posibles.”

“Pues hagámoslo. Puede que cueste un poco más, pero—”

“No me duelen prendas, Fernando. ¡Lo que pasa es que no sé cuál es la cobertura óptima posible!”

En ese momento Gaspar Salinas entró en la sala como un vendaval, jadeando fuertemente. Había tomado un atajo poco recomendable a través de la enrarecida atmósfera marciana sin proveerse de su equipo de respiración extraterrestre autónoma. “¡Eh!



1. ¿CUANTOS DISCOS de 60 grados de diámetro angular podemos alojar sobre una superficie esférica? Vemos a la izquierda una disposición con ocho discos y a la derecha un grupo de 12.

¿Habéis visto el informe de la CeNN sobre los artefactos marcianos—?" Ayuso le hizo gestos con la mano para que dejara el tema. Urdán, sin hacer caso de la exclamación del recién llegado, procedió pacientemente a repetir el problema de los transmisores, pero Salinas no tardó en interrumpirle.

"Perdone, jefe, pero lo primero que hay que hacer es aclarar los detalles. ¿Qué entiende el Supremo por 'cobertura óptima'?"

"Según entiende el equipo jurídico, lo que los magistrados quieren decir es que hemos de proporcionar servicios de televisión a la máxima superficie posible de Marte."

"Saturemos el planeta, pues", dijo Ayuso. "Pongamos tantos repetidores como haga falta para conseguir una cobertura del ciento por ciento."

Urdán se dio en la cabeza con el talón de la mano. "¡Brillante! ¿Cómo no se me habría ocurrido antes? ¡Cresida, póngame con Construcción—"

"Lo siento, jefe, pero ese plan no va a funcionar", murmuró Salinas.

"¿Y por qué no, vamos a ver?"

"En las zonas de superposición de dos repetidores se producen interferencias. Las imágenes salen desdibujadas y a veces se ven ondulaciones raras o imágenes múltiples."

"¿Y ese problema tiene importancia?"

"Me temo que sí", dijo Salinas. "A menos que estemos dispuestos a perder la exclusiva. Si transmitimos imágenes de baja calidad, la competencia va usar nuestras tripas de cordones en los zapatos."

"Anule la llamada, Cresida", ladró Urdán a través del interfono.

"¿Y no habría forma de intercalar entre las existentes zonas extra de transmisión?", quiso saber Ayuso.

"Depende del tamaño del espacio disponible", replicó Salinas. "Cada zona tiene un diámetro angular de 60 grados y—"

"Pare, pare un momento", interrumpió Urdán. "¿Qué es eso del diámetro angular?"

"Marte es una esfera", explicó Salinas. "Los reemisores cubren una zona que solemos llamar 'circular', pero que en realidad es un casquete esférico con contorno circular, como si fuera un círculo ajustado sobre una esfera. El diámetro angular es el ángulo tendido entre dos puntos diametralmente opuestos de esa frontera circular, con vértice en el centro de la esfera".

"Y ese ángulo es de 60 grados", inquirió Urdán.

"Exactamente", prosiguió Salinas. "Ahora bien, la propuesta original especificaba ocho transmisores ubicados en los vértices de un cubo imaginario. Yo calculo que la separación angular entre reemisores vecinos es...". Su voz se tornó ininteligible mientras pulsaba algunas teclas de un ordenador portátil.

"Humm... Un poco más de 70 grados. Bueno; así no hay superposición; de hecho, hay un hiato de 10 grados entre ellos. Uh... ¿cuál era la pregunta?"

"Si podemos insertar entre ellos otros repetidores intermedios", repitió Ayuso.

"Vamos a ver. Las separaciones máximas se dan en los puntos que corresponderían a los centros de las caras del cubo. La separación angular desde un vértice del cubo al opuesto es... hmm... unos 109 grados. Cada repetidor cubre un diámetro angular de 60 grados, o sea, un radio angular de 30 grados, así que la zona muerta entre ellos es de algo más de 109 menos 30, menos otros 30... unos 49 grados." Salinas se quedó mirando expectante a Ayuso.

"En la cual queremos encajar una zona de transmisión de 60 grados."

"Así es, mi sagaz amigo."

"Pero no tenemos bastante sitio."

"Exactamente." Permanecieron sentados y en silencio algunos momentos.

"A lo mejor podemos contraer un poco las zonas", señaló Salinas. "Jefe, pídale a Cresida que llame a los de ingeniería por el tam-tam y se entere del margen de variabilidad en el ajuste de cobertura por zonas."

Un minuto después Cresida hacía entrada en el despacho. "Jefe, ya he averiguado la variabilidad de los reemisores."

"¡Estupendo! ¿Cuánta es?"

"Ninguna."

"¿Cómo que ninguna? Pero, ¿cómo va a ser eso?"

"Es por el nuevo sistema que utilizan los fabricantes", dijo ella en tono de disculpa. "Viene en las etiquetas de las cajas. Solamente dicen 'Transmisor de TV. No contiene elementos que requieran atención del usuario.' No podemos cambiar los ajustes. Serán 60 grados o nada."

"Ya ve para qué vale la perfección de la electrónica moderna, jefe", rezongó Salinas.

"Espere un momento", dijo Urdán. "Puesto que no podemos encajar nuevas emisoras, es forzoso que hayamos dado con la distribución óptima."

Números de osculación

DIMENSION	COTA INFERIOR	COTA SUPERIOR
1	2	2
2	6	6
3	12	12
4	24	25
5	40	46
6	72	82
7	126	140
8	240	240
9	306	380
10	500	595
11	582	915
12	840	1.416
13	1.130	2.233
14	1.582	3.492
15	2.564	5.431
16	4.320	8.313
17	5.346	12.215
18	7.398	17.877
19	10.668	25.901
20	17.400	37.974
21	27.720	56.852
22	49.896	86.537
23	93.150	128.096
24	196.560	196.560

"Lo siento, Martín, pero no es tan sencillo. El hecho de que no podamos añadir nuevos transmisores a la disposición existente no demuestra que una disposición completamente distinta no pueda funcionar mejor."

Urdán volvió a dedicarse a despegar discos del globo y volver a pegarlos en otros lugares.

"Si colocamos esa un poco más allá—", interrumpió Ayuso.

"Me parece que debemos despellejarlos del todo", comentó Urdán.

"Ya lo hacemos, jefe. ¡No hacemos otra cosa en todo el día!"

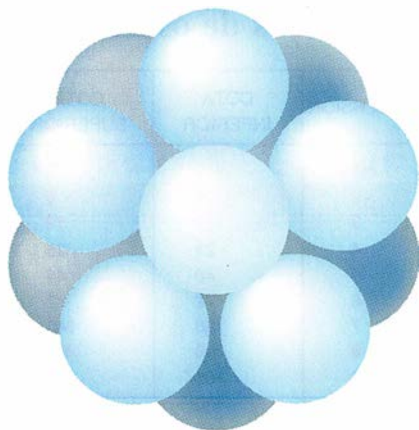
"No estoy hablando de los clientes. Quiero decir que deberíamos arrancar todos los discos y empezar de nuevo, procurando apretujarlos lo más posible. Hay que dejar mucho espacio para los demás."

"¡Ah, de acuerdo! ¡Oiga, jefe, eso tiene muy buen aspecto! ¿Cuántos discos ha conseguido poner?"

Urdán contó hasta 11 discos.

"Ha sido una suerte que hiciéramos esto", dijo Urdán. "Imagine lo que hubiera ocurrido si en nuestra oferta nos hubiéramos atenido a la disposición cúbica y después alguno de los linces de Central Nacional de Noticias le fuera al Tribunal Supremo con esta otra disposición."

"Jefe, si la Central Nacional de Noticias es la mitad de lo que dicen no le quepa duda de que le iba a echar la zarpa al pastel."



2. TRECE ESFERAS del mismo tamaño, dispuestas de forma que la esfera central toque a las otras doce.

"Exactamente."

"Así que si nos decidimos por esa nueva disposición, con 11 reemisores, y la CeNN encuentra la forma de meter 12, estamos listos."

"El máximo tiene que ser 11", dijo Urdán. "No veo la forma de mejorar..."

"¡Acabo de conseguir meter 12 discos en el globo!", gritó Ayuso. "Los he situado en los vértices de un icosaedro", explicó. "Y todavía queda un montón de sitio. De no ser adhesivos, podríamos moverlos de acá para allá por todo el globo. ¿Será posible que lleguen a caber 13?"

"Se me ocurre una idea", entonó Salinas. "Si calculamos la superficie total de la esfera y la dividimos entre el área de cobertura de cada transmisor, tendremos una cota superior para el número de los que es posible apiñar. Sí, ya sé que no estamos teniendo en cuenta los huecos que quedan entre los discos, pero al menos tendremos algo concreto para poder seguir."

"Excelente idea, Salinas. Proceda usted", ordenó Urdán.

"De acuerdo. Supongamos que el radio de Marte sea igual a 1."

"No quiero poner pegas, Salinas, pero el radio marciano es de 3390 kilómetros."

"Quería decir que tomásemos el radio de Marte como unidad. En principio, las unidades que se tomen importan poco, pero los cálculos resultan más sencillos si el radio es 1. En tal caso, la superficie es 4π. El área de un casquete esférico de 60 grados es... vamos a ver... $(2 - \sqrt{3})\pi$, o sea, alrededor de $0,2679\pi$. Por lo tanto, el número de zonas ha de ser menor o igual que $4\pi/0,2679\pi$, o sea, aproximadamente 14,9. Dado que el número de zonas es necesariamente un entero, el máximo será menor o igual que 14."

"Muchas gracias, Salinas, pero eso no nos ayuda a determinar si el número óptimo es 12. Todavía podría ocurrir que fuese 13 o 14", dijo Urdán.

"Me pareció que podría valer la pena intentarlo, jefe. Si por lo menos tuviéramos forma de relacionar nuestro problema con algún rompecabezas matemático que haya sido resuelto ya... Espere, espere un momento."

"¡Salinas, si todo lo que se le ocurre es—"

"¡El número de besos! ¡Eso es!", exclamó Salinas.

"Salinas, TeleMarte no difunde programas de esa clase", dijo Urdán, fruncido el ceño. "Aunque, quizás..."

"Discúlpeme, jefe. Me estaba refiriendo a un problema clásico sobre esferas tangentes. Seguramente habrá oído hablar de él. ¿Cuál es el número máximo de esferas iguales que pueden 'besar' —ser tangentes— a una esfera de su mismo tamaño sin intersecarse entre sí?"

"No acabo de—"

"Piénselo primero en dos dimensiones", sugirió Salinas. Rebuscó en el bolsillo y extrajo un puñado de monedas. Colocó una sobre la mesa y preguntó: "¿Cuántas monedas iguales podemos colocar alrededor de ésta, de modo que todas la toquen?"

Urdán estuvo tanteando unos segundos con las monedas. "Seis", respondió. "Encajan justas en torno a la moneda central."

"Nuestro problema es muy parecido, pero con esferas en vez de círculos", explicó Salinas. "Necesitamos saber cuál es el número máximo de bolas de rodamiento, todas iguales, que es posible colocar en torno a una bola del mismo tamaño."

"Pero Salinas, las zonas de nuestros transmisores son círculos, no bolas de acero", opuso Urdán.

"En realidad son casquetes esféricos, jefe. Pero eso importa poco. Imagine dos esferas en contacto. Al proyectar radialmente una sobre otra obtenemos un casquete esférico cuyo diámetro angular es de 60 grados. Cualquier disposición de casquetes esféricos de 60 grados que no se traslapen —o sea, zonas como las nuestras— corresponde a una disposición de esferas 'osculantes'. Así que nuestro problema es el 'número de osculación' correspondiente a esferas tridimensionales, levemente disfrazado."

"Tenía entendido que las esferas siempre son tridimensionales."

"La verdad es que se puede plantear la misma cuestión en espacios de cualquier número de dimensiones. Permítame que consulte mis viejos apuntes." Echó mano de un desorganizador personal bastante azacanado y murmuró rápidamente algunas frases al aparato. "Sí, mire, aquí tengo una tabla de los resultados más importantes para espacios de dimensión menor o igual que 24."

Inspeccionaron el cuaderno electrónico de Salinas [*véase la tabla adjunta*]. "Se conoce el número exacto para las dimensiones uno, dos, tres, ocho y veinticuatro," hizo saber Salinas. "Hasta hace muy poco, yo hubiera añadido 'y para ninguna más', pero por las noticias que han traído las ondas, Wu-Yi Hsiang, de la Universidad de California en Berkeley, anunció recientemente haber resuelto el problema en cuatro dimensiones. La solución es 24."

"¿Quiere decir que se desconoce la solución en el caso de cinco dimensiones y sin embargo se conoce en el de ocho? ¿Y también en dimensión 24, nada menos? Pero, ¿cómo puede ser eso?", se extrañó Urdán.

"Bueno, en el caso de cinco dimensiones se conoce una disposición con 40 esferas y se sabe también que no es posible colocar más de 46. Pero hasta ahora nadie ha podido reducir este salto."

"Estupendo. ¿Y por qué razón son más sencillos los casos de ocho y veinticuatro dimensiones que el de cinco?"

"Andrew M. Odlyzko y Neil J. A. Sloane, de los laboratorios AT&T Bell, dieron con una forma de estimar una buena cota superior para el problema en ocho y en 24 dimensiones", señaló Salinas. "Su cota fue tan buena que resultó coincidir con la mejor de las disposiciones de esferas que se conocían. El problema quedó zanjado en esos casos."

"Pero seguimos sin saber la causa", objetó Ayuso. "Sólo dice que es cierto"

"Verá...", repuso Salinas con cierta incomodidad, "según parece, los espacios de ocho y de veinticuatro dimensiones tienen algo bastante insólito. Todos los problemas de empaquetamiento de esferas funcionan óptimamente en esas dimensiones."

(A los lectores de esta sección puede resultarles difícil asir esferas de veinticuatro dimensiones; quizás gusten en tal caso de probar mano

con problemas parecidos pero más familiares, de los que hay abundante muestrario. Por ejemplo, hallar el mínimo círculo o el mínimo cuadrado capaz de contener un número dado de monedas iguales o averiguar el número de osculación correspondiente a figuras planas como pentágonos o elipses. Los más ambiciosos podrían atacar el problema de los transmisores marcianos con zonas cuyo diámetro angular fuese algún valor distinto de 60 grados. Y si verdaderamente desean un problema para perder la chaveta, piense cuál habría de ser el diámetro angular máximo de las zonas si quisiéramos alojar sin traslaparse un número dado de zonas idénticas. Los matemáticos han hallado soluciones cuando el número de zonas es menor o igual que 12, y han conjeturado soluciones para unos cuantos números más altos.)

Urdán interrumpió la explicación. "Según su tabla, se sabe que en tres dimensiones el número de osculación es 12."

"Así es", respondió Salinas. "Isaac Newton y David Gregory disputaron sobre la cuestión en 1694. Newton afirmaba que la solución era 12; Gregory pensaba que podrían ser 13. En el siglo XIX, C. Bender, R. Hoppe y S. Günther expusieron sendas demostraciones de que Newton estaba en lo cierto—"

Salinas paró un instante para tomar aliento y siguió a toda prisa, no fuera nadie a meter baza. "Pero la demostración dista de ser sencilla. Una de las fuentes de dificultad reside en que la disposición no es rígida; hay muchísima libertad para llevar las esferas de un sitio a otro sin perder el contacto. A decir verdad, es posible redisponerlas de la forma que se quiera sin que se intersequen, siempre tocando a la esfera central. No es preciso, pues, que se encuentren en los vértices de un icosaedro. Y esa es una de las razones por la que han sido resueltas las versiones de ocho y veinticuatro dimensiones: en ellas hay esencialmente una única forma de colocar las esferas. Siempre es más fácil atinar en una solución cuando, por así decirlo, sólo hay una."

"¿Cómo logró Hsiang resolver el caso de cuatro dimensiones?", preguntó Ayuso.

"Hsiang consiguió recientemente resolver un problema muy importante atinente al empaquetamiento de esferas, a saber, la forma óptima de empaquetar esferas en tres dimensiones, un problema que se remonta a Johannes Kepler, en 1611. Hsiang ha anunciado que sus nuevas técnicas son aplicables tambien al caso de la osculación cuatridimensional. De todas formas", añadió Salinas, "aún no he visto la demostración."

"¿Y para qué la queremos?", rezongó Urdán. "Sabemos de fijo que en tres dimensiones el número máximo es 12, así que bastará una disposición regular, icosaédrica, para ir sobre seguro. Cresida, póngame con los de Construc—"

"Jefe, ya sabe que he estado tratando de contarle lo que la Central Nacional de Noticias ha difundido esta mañana."

"Se lo he dicho ya varias veces. No me interesa—"

"Pues debería. Según parece, entre los artilugios marcianos han encontrado máquinas muy extrañas... ¡y algunas de ellas funcionan todavía! Los arqueólogos han empezado ya a experimentar con ese equipo y—"

Fue como si el suelo temblara sin moverse en realidad. Se tenía la impresión de que todo fuera distinto aunque fuera exactamente igual. Resultaba sumamente desconcertante. "¡Ay, ay, ay!", exclamó Salinas. "¡Tenían razón, tenían razón!"

"¿Razón en qué?", restalló la voz de Urdán. "¡Venga, hombre, suéltelo de una vez!"

"Es un martemoto dimensional. Marte acaba de tornarse 24-dimensional."

Martín Urdán miró por la ventana a la montaña 24-dimensional que tenía enfrente. De repente dio signos de gran agitación. "Salinas, ¿tienen los seísmos dimensionales algún efecto sobre el dinero en efectivo?"

"Ninguno, jefe, salvo que las monedas, en lugar de dos caras, tendrán ahora muchísimas más."

"¡Fantástico! Cresida, llame a la CeNN y dígales que pueden quedarse la exclusiva marciana a cambio de nada."

"Jefe, me parece que estos seísmos le han revuelto la mollera."

"De ninguna forma. Quien pretenda construir la red de retransmisión tendrá que instalar ahora 196.560 transmisores, al costo aproximado de un millón de dólares cada uno, o sea, en números redondos, unos veinte billones de pesetas. Estaré encantado de ver cómo se las arregla la CeNN para sacar semejante suma de sus cuentas bancarias tridimensionales."

"¡Ah, jefe! ¿Me deja contarle lo del artefacto que transforma la piedra en oro?"

Libros

Esteban Rodríguez Ocaña, Angel Romo, Luis Alonso y Javier de Lorenzo

XVI español

Urólogos y cirujanos

CIRUJANOS, URÓLOGOS Y ALGEBRISTAS DEL RENACIMIENTO Y BARROCO, por Juan Riera. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valladolid; Valladolid, 1990.

La dilatada y fecunda carrera del profesor Juan Riera Palmero, actual catedrático de historia de la ciencia en la Universidad de Valladolid, se enriquece con un texto nuevo, el que comentamos aquí, si bien algunos de sus capítulos han visto la luz por separado hace tiempo.

Se trata, más que de una obra unitaria, de una reunión o compendio de diversos acercamientos más o menos particulares, todos interesantes, a los saberes urológicos ("La urología en los textos médicos del Renacimiento", "La obra urológica de Andrés Laguna", "La obra urológica de Francisco Díaz") y a la práctica quirúrgica, tanto realizada por titulados como por empíricos hábiles ("Urólogos y algebristas del Renacimiento y Barroco", "Curaciones, exámenes y licencias", "El licenciado Izquierdo y otros profesionales"); en este caso, se trata de prácticos castellanos, los más conspicuos de los cuales asentaron, en algún momento, en Valladolid.

Pero no se crea que se trata únicamente de una unidad forzada por el arreglo de imprenta, en absoluto. La lectura atenta advierte que, como en una composición musical, los temas subsiguientes aparecen apuntados en los anteriores, en detalles que se desarrollan hasta alcanzar personalidad propia en capítulos sucesivos. Por ejemplo, se resalta la figura de Andrés Laguna (c. 1510-1559), por su relevancia entre los autores médicos del Quinientos; en relación con él, y con el tratamiento de las "carnosidades" uretrales, aparecen en el primero de los trabajos Francisco Díaz (c. 1530-1590) —cirujano de cámara de Felipe II— y un doctor Romano. Este último reaparece en el capítulo cuarto, junto a otros expertos litotomistas vallisoletanos, como el maestro Izquierdo y el licenciado Castellanos, los cuales constituyen el eje argumental de buena parte de los dos capítulos restantes.

Se completa la edición con 25 páginas de apéndice documental, donde se transcriben cinco de los documentos de archivo manejados como fuente por el autor, de los que cuatro versan sobre las habilidades urológicas del mencionado doctor Romano.

Como hemos señalado, los cuatro primeros de estos capítulos corresponden a otros tantos artículos o comunicaciones a congresos, fechados en 1966, 1967 y 1972. Su dispersión y lejanía realzan la utilidad de su reimpresión bajo una misma cubierta.

Desde la perspectiva historiográfica, este volumen suministra una cumplida muestra de la evolución del quehacer metodológico seguido por nuestro autor, quien ha evolucionado desde la lectura estricta de textos clásicos y la preocupación por las "grandes figuras" en los inicios de su carrera, a una atención por los problemas del ejercicio profesional, esto es, la inserción social de saberes y prácticas sanadoras, fundamentada en la consulta detenida y paciente de colecciones archivísticas, en particular las del Archivo de la Real Chancillería de Valladolid, el Histórico Provincial de la misma y el Archivo General de Simancas.

Merece atención la fluida relación entre habilidades manuales y saberes que muestran los distintos trabajos de este libro, donde queda claro la lejanía teórica inicial, respecto de la medicina profesional, de las prácticas urológicas (y traumatológicas —algebristas—, aunque a éstas dedique menos espacio la investigación). En este sentido, se puede considerar como una reafirmación de la hipótesis del "imperialismo" médico como vía moderna de profesionalización y especialización, al producirse el acaparamiento monopolístico de prácticas con anterioridad en manos de legos.

Los tres primeros capítulos del presente texto supusieron una notable contribución a la historia de los saberes hispanos del siglo XVI sobre los padecimientos urológicos. Bien que el autor se ocupa con mayor ahínco de la revisión de textos de medicina, el estudio dedicado a Francisco Díaz y su *Tratado de todas las enfermedades de los Riñones, Vixiga, y Carnosidades de la Verga, y Urina* (1588), una de las figuras quirúrgicas de mayor relevancia en dicho período y al que bien puede asignársele la responsabilidad en el inicio del acercamiento moderno a la urología, complementa con suficiencia tal extremo.

En los tres últimos es más rica la acumulación de fuentes de archivo, en su mayor parte inéditas, procedentes de Actas de Cortes, protocolos notariales o Quitaciones de Corte. El aprovechamiento de la "Información de testigos", realizada ante un escribano y un teniente de Corregidor de Valladolid por el Licenciado Juan Izquierdo en junio de 1570, sirve para reflejar, con precisión inusitada, la carrera de un cirujano español del siglo XVI (aunque no se ha podido probar que fuera médico titulado), posiblemente, a juicio del autor, uno de los más importantes cirujanos prácticos (no realizó publicación alguna) de la Europa del Renacimiento. Esta fortuna hace del capítulo correspondiente ("El Licenciado Izquierdo y otros profesionales") otra pieza notable, como aportación novedosa a la historia social de la medicina moderna en España. (E.R.O)

Flora del Mediterráneo

Creta, Córcega y los Balcanes

CONTRIBUTIONS Á LA FLORE ET LA VÉGÉTATION DE LA CRÊTE, por Jacques Zaffran. Publications de l'Université de Provence; Aix, 1990. **LA VÉGÉTATION DE LA CORSE**, por Jacques Gamisans. Jardin Botanique de la Ville de Genève; Genève, 1991. **MOUNTAIN FLORA OF GREECE**, por Arne Strid. Cambridge University Press; Cambridge, 1986.

La tradición florística del Mediodía europeo se enriquece con estas tres floras, que simbolizan, con sus limitaciones, el estado de la cuestión.

Las *Contributions à la flore et à la végétation de la Crête* aborda el estudio de la mayor isla del Mediterráneo oriental, que presenta una amplia variedad de microhábitats. La obra incluye tres bloques de documentación. Dedica el primero a la descripción del medio físico: relieve, geología, geografía, clima y suelo.

Ofrece el segundo bloque un catá-

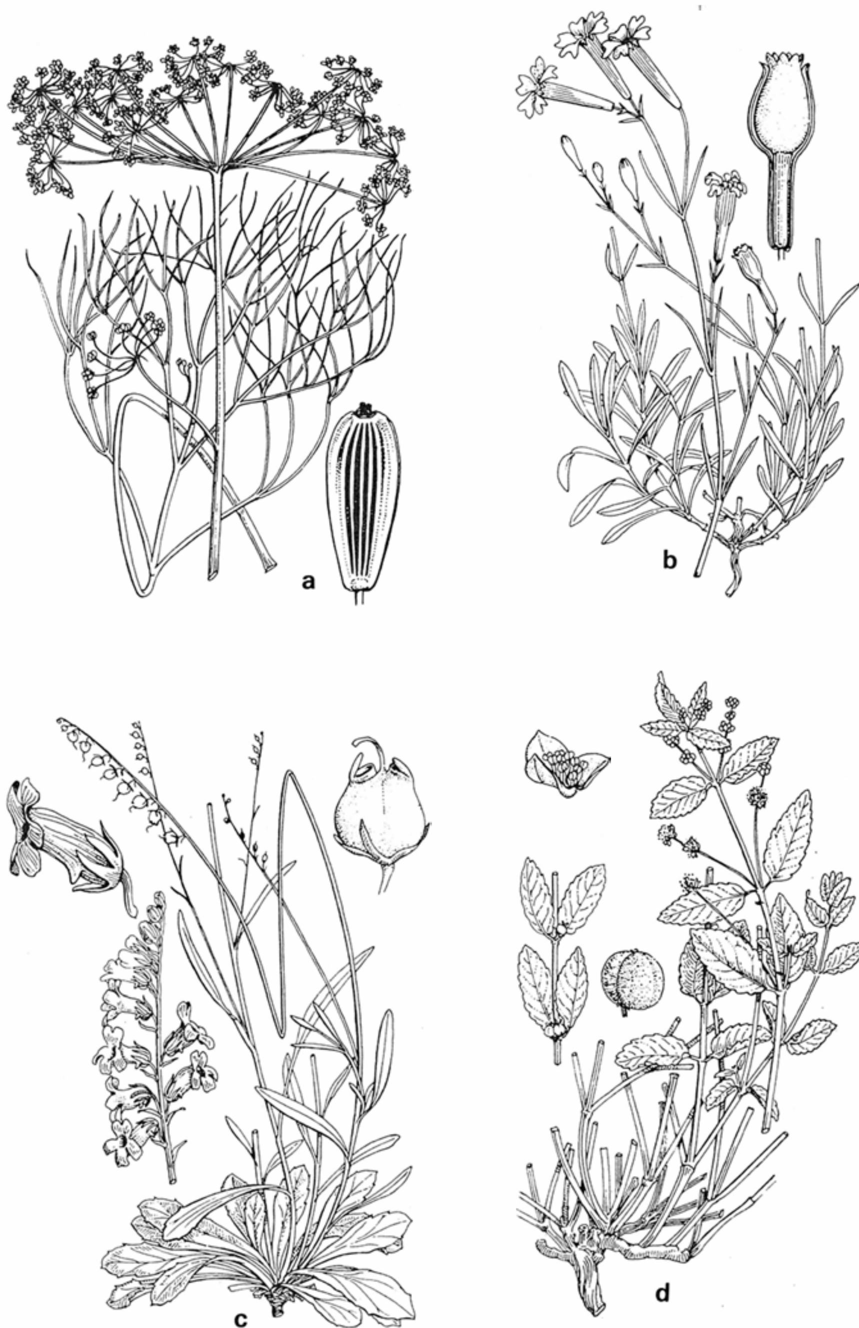
logo florístico de las especies encontradas en la isla, con un total de 1061 taxones diferentes, que aparecen ordenados con su nombre linneano, el del autor y el del lugar de descripción. Se indica luego el grado de frecuencia de cada planta; viene después la relación de localidades donde se ha documentado; en ocasiones se añaden la altitud en que medra y la ecología de la estación. A veces se señala su distribución general en la isla o se acota el área total de la especie. De lo que el lector puede inferir algunas limitaciones del texto: carencia de una ordenación metódica de la documentación y falta de coherencia en la información de una especie a otra. A modo de ejemplo, se nos da a conocer cuántas especies de jara hay en Creta, pero se nos priva de saber los límites altitudinales y las condiciones ecológicas en que se encuentran.

En una obra académica con las pretensiones de ésta, hubiera sido obligado aportar una revisión crítica de la bibliografía disponible, así como afinar más en el apartado de las distribuciones generales. Se omiten especies cretenses (*Quercus brachyphylla*) y se acepta la existencia de otras rechazadas (*Quercus pubescens*).

El panorama cambia al introducirse en la vegetación. Las tablas de inventarios son exhaustivas, además de representativas, en lo concerniente a la alta montaña; es una pena que no mantenga ese rigor en la zona media y baja. No queda clara la opinión del autor sobre la zonación de la vegetación de la isla. Sin duda, y a modo de resumen, una notable compilación de datos en bruto que podrán aprovecharse para ulteriores elaboraciones en bien del lector.

En el conjunto de las islas mediterráneas, Córcega reúne una serie de atributos que favorecen la mltiplicación de hábitats y microhábitats, en un relieve accidentado y altitudes de cierta consideración. Los montes Cintu y Rotundu rayan los 2700 metros; se alternan substratos calizos con los silíceos y presenta la isla una pluviosidad que oscila entre los 750 y los 1500 mm anuales.

Eso nos lo detalla con minuciosidad Gamisans en *La végétation de la Corse*. Tras la descripción del medio físico y los pisos de vegetación, enumera las grandes unidades fisionómicas del paisaje vegetal. De cada comunidad vegetal se da el nombre vulgar y el latino, de acuerdo con la nomenclatura fitosociológica, amén de señalar otros factores apropiados al caso, como son la ecología de la comunidad y la explicación de las afinades. Se cierra el libro con un índice sintaxonómico de comunidades, muy práctico. Eugenio Sierra, en los dibujos, y Josep Nuet, en gráficas y esquemas, consolidan el valor de este vademécum.



Frutíceas enanas supramediterráneas. a: Peucedanum paniculatum*; b:* Silene nodulosa*; c:* Anarrhinum corsicum*; d:* Mercurialis corsica.

Porque la obra está pensada, en efecto, para llevársela al campo en los trabajos de investigación *in situ*. Quizá pudiéramos discutirle la asignación de los pisos de vegetación, en particular en la comparación entre vegetación mediterránea y centroeuropea, con ausencia de comentarios sobre la vegetación submediterránea.

Mountain flora of Greece, de Arne Strid, es el primer volumen (que se ha reeditado ya) de una obra pensada para abarcar en cinco la flora de las montañas de Grecia y Creta. Como siempre, se empieza por describir el territorio y se exponen las grandes divisiones fitogeográficas con las respectivas áreas involucradas; en Grecia continental se reconocen siete unidades y una en Creta. Voluntaria, y un tanto forzadamente, el estudio se limita a las áreas de montaña situadas por encima de los 1800 metros. (Diríase que el criterio escogido ha sido la facilidad de acceso y exploración, en la época estival, y no una razón biogeográfica o de cambio de flora.)

Este primer volumen comprende de los Pteridófitos a las Apiáceas. Les precede una clave general de familias; de cada una expone luego unas pinceladas generales y una clave de géneros; la clave de géneros nos lleva a las especies. A propósito de éstas, una vez más, se da el nombre latino, el del autor y el lugar de publicación, más los sinónimos frecuentes con el lugar donde aparecen. Se prosigue hasta la ecología general, con los límites altitudinales y las comunidades donde se hallan.

Tras indicar el área general de distribución del taxon, y el número cromosómico de las especies, se detallan las disparidades de los recuentos griegos con respecto a los obtenidos en otras latitudes. El carácter práctico culmina en el triple índice: de especies, montañas y combinaciones nomenclaturales.

La obra, modélica en algunos aspectos, presenta ciertos errores de forma. Por ejemplo, falta de coherencia en la descripción de las especies de las euforbiáceas; las claves dicotómicas contraponen muchas veces un solo carácter diagnóstico, y apenas se atiende a los rasgos de gran parte del ciclo de la planta.

Tiene, pues, el lector ante sí una tríada significativa de la flora mediterránea, en particular de la griega continental e insular, una de las más ricas de Europa y fuente de inspiración del primer botánico de la historia: Teofrasto. (A. R.)

Renacimiento

Ficino y Pico

THE MODERN AGE AND THE RECOVERY OF ANCIENT WISDOM, por Stephen A. McKight. University of Missouri Press; Columbia, 1991. **MARSILIO FICINO. LETTERE.** Edición preparada por Sebastiano Gentile. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1990. **MARSILIO FICINO. THREE BOOKS ON LIFE**. Edición crítica y traducción con introducción y notas de Carol V. Kaske y John R. Clark. Medieval and Renaissance Texts and Studies; Binghamton, 1989. **JEAN PIC DE LA MIRANDOLE (1463-1494), HUMANISTE, PHILOSOPHE ET THEOLOGIEN**, por Fernand Roulier. Editions Slatkine; Ginebra, 1989.

Lo primero que parece obligado aclarar, a propósito del Renacimiento, es su identidad. ¿Hubo o no hubo Renacimiento? ¿Se distingue del Humanismo? ¿Supone una ruptura, un freno o un avance con respecto a la Edad Media? ¿Cuáles son las notas distintivas de ese período de la historia occidental? Expertos renombrados en la ciencia, la filosofía, la literatura y el arte de los siglos XV y XVI, han declarado ante esas preguntas, al atardecer de su vida, que quizá sea demasiado pronto para responder con solvencia. Tras esas cuestiones abiertas yace una secular controversia de pros, contras y matizaciones, cuyo encono no ha terminado todavía.

Siguiendo el consejo de los clásicos, no envolveremos al lector primerizo con marañas argumentativas y sutilezas de réplicas y dúplicas. En vez de terciar, nos parece más sensato adentrarse en esas centurias a través de la lectura y la biografía de las obras y los personajes centrales. ¿Y qué libros recientes podemos considerar adecuados para ello? En mi opinión, los arriba señalados, con las obvias limitaciones de toda selección.

The Modern Age and the Recovery of Ancient Wisdom nos encuadra el panorama, al tiempo que define el ámbito de nuestra figura principal, Marsilio Ficino. McKnight se asoma al Renacimiento desde la óptica de la *prisca theologia* ("Ancient Wisdom"). Entiéndese por tal la prístina revelación, supuestamente realizada por Dios, a los sabios precristianos, no hebreos, de Oriente Próximo y el Mediterráneo, en particular a persas y egipcios. La recuperación de los principales documentos por Ficino y los neoplatónicos habría de significar la incoporación, y disolución, del hermetismo en el hontanar común del saber. Traerá ello consigo la autoafirmación del hombre nuevo, renacentista, seguro de su capacidad de dominar la naturaleza y la sociedad de su tiempo.

En contraposición a Hans Blumenberg, McKnight sostiene que la prisca theología que empapa todas las formas de expresión filosófica y artística del período no es la de un Dios trascendente, cada vez más alejado de los negocios humanos, sino la de una tradición inmanentista, afirmadora de la bondad del mundo y la dignidad concreadora del hombre. Y empapa todas las formas del conocimiento y manifestaciones de la sensibilidad porque constituye el comienzo de una nueva era ilustrada, exalta la búsqueda intelectual y pone en esta actividad la fuerza del dominio sobre la naturaleza.

El punto de arranque de esa nueva orientación de cuño hermético lo marcan las dos obras principales de Ficino: *Theologia platonica* y *De vita triplici*, donde la figura del hombre es ahora la de un dios terrenal, que compendia el macrocosmos y el microcosmos y se sirve de la magia astral para vencer el destino. La sombra de Ficino se proyecta sobre el arte, por ejemplo, de Giotto, que humaniza las figuras estilizadas de los bizantinos, o en la capilla funeraria de los Medici, que, con evocaciones del antiguo Egipto, recrea la imagen del universo y la estancia expectante del alma. Llega, a través de Agrippa, Bruno y Campanella, hasta la utopía de Bacon, quien confiere valor soteriológico a la ciencia.

Pero, ¿quién era Marsilio Ficino? Hijo del médico de Cosme de Médicis, había nacido en 1433 en Figlione, cerca de Florencia. Estudió medicina en Pisa, licenciándose en la Universidad de Bolonia en 1458. A los cuarenta años se ordenó sacerdote y murió en 1499. Otro prohombre del Renacimiento, Angelo Poliziano, le dedicó el siguiente epitafio: "(A quien haya sobresalido) en integridad de vida, ingenio, inspiración y sabiduría suprema: ¿queréis que le ponga nombre? Marsilio."

Esas y otras cualidades van aflorando en la correspondencia, en su *Lettere*, cuyo primer libro, de los doce que aparecieron, ha publicado Olschki, en edición crítica de Sebastiano Gentile, quien lleva ya varios años consagrado al estudio de nuestro autor (colación de la obra manuscrita, suerte de la obra publicada y su traducción, contenido doctrinal de la misma). La larguísima introducción a las *Lettere,* trescientas páginas, constituye en realidad un tratado sobre la historiografía renacentista, pero no entorpece la lectura del novicio que puede prescindir del aparato crítico y dejarse llevar por la descripción sugestiva de la entrada del platonismo en Florencia de la mano del bizantino Giorgio Gemisto Plethon y, simultánea con ésta, la introducción del saber esotérico, desde el persa Zoroastro en adelante.

El manojo de ideas que conviene destacar se va reuniendo con documentación sólida en las dos partes nucleares del estudio previo: la restauración de la utopía platónica con Cosme y el análisis de las cartas. El de Médicis soñaba con establecer una república ilustrada, bajo su mandato protector, que fuera milenaria en libertades y desarrollo de las ciencias, las artes y las letras, donde toda opinión, y toda fe, tuvieran cabida.

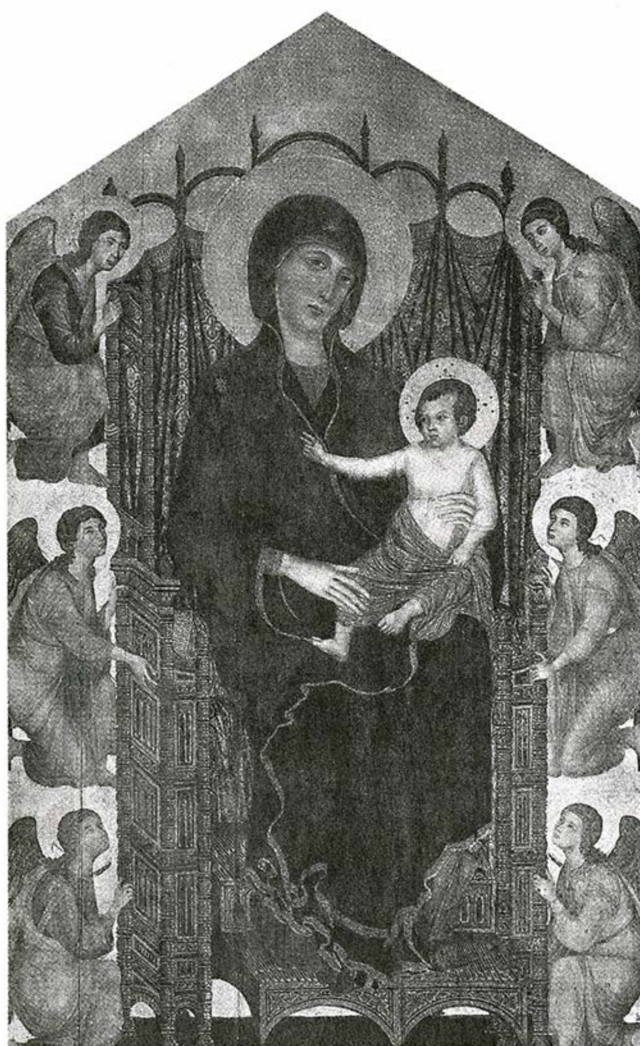
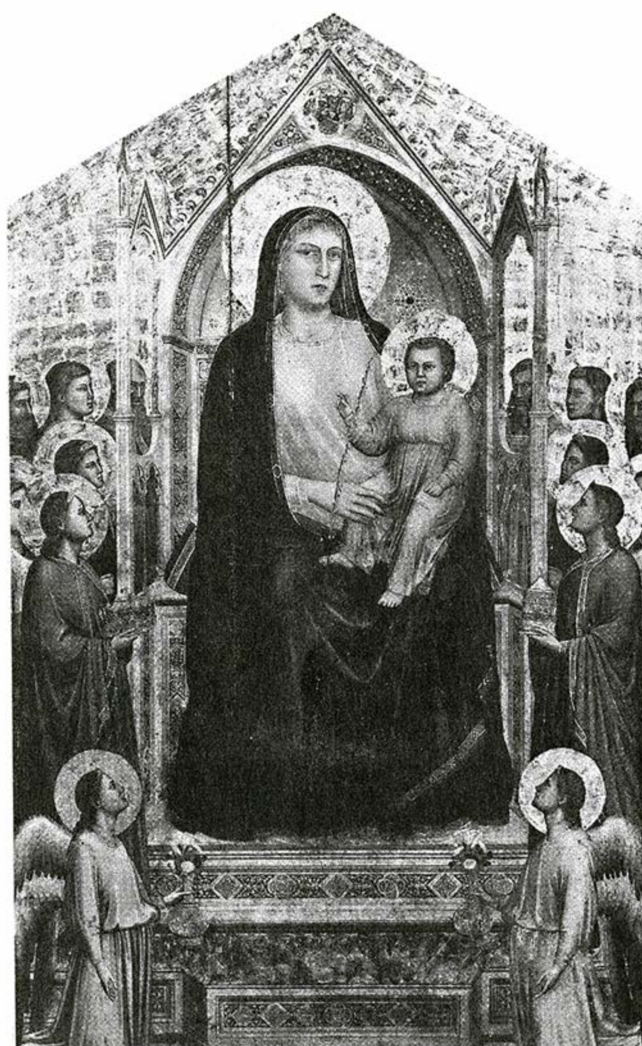
El examen del epistolario de Ficino se torna paradigmático de un gé-

nero que será distintivo del Renacimiento. Y es en ese punto donde nos hubiera gustado ver completada la exposición de la historia de los doce libros y de la evolución interna de cada carta con una aproximación interna de su contenido. Cierto es que el lector puede moverse por ellas sin mayores auxilios (con más soltura si se ofreciera su traducción). A modo de avance o muestra, encontraremos en su estilo sentencioso una proclividad hacia los temas morales (tolerancia, amor a la patria, la familia y los amigos —el amor y la amistad es asunto dominante—, generosidad, aprovechamiento del tiempo, veracidad, perseverancia, vida retraída), filosóficos (ideas platónicas, felicidad, inmortalidad del alma, unicidad del entendimiento), teológicos, científicos y artísticos (valor de la música).

Los bizantinos que habían acudido al Concilio de Ferrara-Florencia, en los años treinta del siglo XV, deslumbraron a Cosme de Médicis, en particular el citado Plethon con sus enseñanzas neoplatónicas. Cosme mandó comprar todos los manuscritos de Platón y le cedió a Ficino un palacete en Careggi para establecer la Academia dedicada al filósofo. Como primera tarea le urgió aprender griego para traducir sus obras al latín, y en eso estaba cuando mandó interrumpir el trabajo para acometer lo propio con el *Corpus Hermeticum*, que él dividirá en *Pimander* y *Asclepius*.

Hermes, apodado Trismegisto (es decir, tres veces el grande: el mayor filósofo, el máximo sacerdote y el más encumbrado de los reyes), viene a ser el Moisés de la religión egipcia, iniciador de una escuela en la que militaron Orfeo, Pitágoras, Filolao y Platón. Vemos, pues, que en Ficino la sabiduría universal, la prisca theologia, incoada y revelada a Hermes culmina en Platón. Se defiende, entre sus postulados principales, que la mente es la forma arquetípica que existe antes del comienzo del cosmos, que el mundo ha sido creado a través del demiurgo (salvo el hombre que lo hizo Dios y es partícipe de su inteligencia, el don humano más preciado), que hombre y naturaleza se necesitan y aman.

Con esa doctrina hermética que ha aprendido mientras traducía al latín los escritos de la tradición antes señalada, tejerá Ficino sus dos escritos principales: *Theologia platonica* y *De vita triplici*. En la primera le anima un doble propósito: ofrecer una nueva explicación de la naturaleza humana y admirar la obra de la creación. El hombre está destinado a ser feliz, y se convertiría en el ser

La Virgen y el Niño en cuadros de Duccio (izquierda) *y de Giotto* (derecha) *constituyen la expresión plástica de dos mundos, el medieval y el renacentista. La pintura, bidimensional, de Duccio se propone mover a devoción minimizando los aspectos mundanos y resaltando los espirituales: el fondo, dorado, simboliza la belleza, la inmortalidad y la divinidad; las figuras se estilizan. La pintura, tridimensional, de Giotto presenta, por contra, una escena realista, en la que las figuras son de carne y hueso.*

más desdichado si no fuera por el alma que le capacita para comprender y dominar la naturaleza, y librarse de la tiranía de la determinación que gobierna las cosas inertes, las plantas y los animales. El hombre es el único ser capaz de hacerse a sí mismo, confianza que le permite entregarse al estudio de la ciencia en el que ha de encontrar su propia salvación.

De vita triplici es un texto fundamental para entender la cosmología del Renacimiento y la elevación de la magia a la forma más alta de filosofía. Lo explica McKnight, y había sido antes tema predilecto de investigación en el Instituto Warburg, con su fundador al frente. Para mantener esa proposición se necesita, sin embargo, leer en clave simbólica la proclamación ficiana de la influencia de los astros (de Saturno) en la vida del hombre, un empeño que goza de extensa bibliografía. No veo yo con claridad el éxito de ese esfuerzo, que obliga a admitir la magia astral como la expresión más noble de la medicina natural y se apoya en un galenismo arabizado (Serapión, Mesue, Avicena) que algún contemporáneo suyo comenzará en seguida, cargado de razón, a poner en solfa.

Venturosamente el lector dispone, desde 1989, de la edición crítica del *De vita triplici*, preparada por Carol V. Kaske y John R. Clark, que constituye el volumen 57 de la autorizada colección "Medieval and Renaissance Texts and Studies". Constituye el primer tratado sobre la salud del intelectual, del hombre dedicado al estudio, y, a pesar de la complejidad de su lectura, gozó de amplia difusión en su tiempo.

La obra se divide en tres libros, médicos dos y hermético el tercero. El primero, *De vita sana*, atribuye a la bilis negra, al humor melancólico, la causa orgánica de ese ser enfermizo que es el genio, aquejado en buena parte de sus días por insomnios, miopía y migrañas. Mas, para culminar su quehacer, el hombre de estudio necesita años, una *vita longa*, título del libro segundo; lo conseguirá con un talante equilibrado y ciertas medidas higiénicas y remedios farmacológicos que son apropiados para mantener en buen estado su constitución humoral. En el tercer libro, *De vita coelitus comparanda*, deja de lado su formación médica en aras de su pasión filosófica: la astronomía ptolemaica, el neoplatonismo de Plotino y la tradición oculta (mágica) se dan la mano en un frenesí de imágenes, símbolos (estatuas, talismanes), fuerzas cósmicas y démones, que sólo es capaz de contener su adhesión a la Iglesia negadora de ese magma, reputado por muchos, sin duda reductivamente, el auténtico nervio renacentista.

En casi doscientas páginas, entre introducción, notas y comentarios, Clark (responsable de la edición latina) y Kaske (de la traducción inglesa) van sacando a la luz los mil hilos de las influencias, dobles sentidos, contradicciones, fuentes de inspiración (verbigracia, en las obras que por entonces está traduciendo) y demás que se les ha escapado a cuantos han bebido directamente de la edición "notoriamente corrompida" de 1576, la de manejo usual. Hacen posada en la doctrina de la melancolía, temperamento depreciado y sujeto a la influencia temida de Saturno en la tradición astral. Ficino va y viene entre el determinismo de esos condicionantes genéticos (por constitución y por haber nacido bajo la influencia de ese planeta) y la libertad de albedrío que enseña el cristianismo; con la excusa de esa disputa filosófica, elabora una psicología humoral abierta a las nuevas orientaciones artísticas y literarias. De las formas de magia, del papel crucial del *spiritus* (en sentido médico, es decir, nexo sutil entre mente y cuerpo, y cosmológico, nexo entre el universo y el hombre), así como del sincretismo entre doctrinas que caracteriza a partir de Ficino la nueva mentalidad, se expone aquí lo suficiente.

Sincretismo o concordancia, maestro de la cual fue Juan Pico de la Mirándola (1463-1494), arquetipo del hombre del Renacimiento para los propios humanistas (Policiano, Hermolao, Leoniceno). La biografía que Fernand Roulier publicó en Slatkine (*Jean Pic de la Mirandole...*) constituye, sin par, la mejor aproximación a su vida, su obra y su doctrina. Ayuda incluso a entender el pensamiento de Ficino, cuando coloca a ambos en sendos platillos de comparación.

De inquietud universal, afirmóse durante mucho tiempo que mariposeó por todas las escuelas y modas con la misma frivolidad mundana de su edad veinteañera. Acudió a Ferrara, perteneció al círculo florentino, bajó a Roma y subió a París, siempre en busca de saber. Pero, lo demuestra Roulier, por ninguna doctrina pasó de puntillas. Dominaba el griego, el latín, el hebreo y el arameo, pues, decía, a los autores hay que leerlos en su propia lengua. Poseía una biblioteca envidiable de manuscritos y libros impresos. Datos que contribuyeron a crear una imagen deformada de hombre de letras, apresado en la tendencia nominalista entonces muy vigorosa. (Otras tendencias del pensamiento del siglo XV eran el escepticismo, el neoplatonismo y el neoaristotelismo, unidas las cuatro por la común aversión contra la escolástica decadente.)

Su alergia antiverbalista se manifiesta en las *Disputationes adversus astrologiam divinatricem*, crítica de la corriente oculta que no se funda en la ciencia (en la astronomía), sino en pseudoexperimentos, y niega, además, la libertad del hombre. El bárbaro, escribe rotundo, no es el escolástico que arruina el latín de los clásicos; lo es aquel que pone la belleza en las palabras en vez de descansar en la belleza de las cosas, el que se queda en la *scientia nominum* sin proseguir hacia la *scientia rerum*. La ciencia genuina deduce sus conclusiones de unos principios gracias a un método de investigación que asocia la autoridad de los maestros con el testimonio de los sentidos y el juicio de la razón. El testimonio de los sentidos se ejercita por la experimentación, por la observación minuciosa. La razón da un paso más y busca el motivo que subyace bajo el fenómeno examinado. Compete a la filosofía ir más allá del conocimiento restringido de los distintos dominios (los campos de la ciencia) para encontrar el principio último de todo lo existente y manifiesto. Todas las grandes doctrinas tienen su punto de verdad, defiende, y no importa tanto descubrir los puntos comunes (Ficino) cuanto resaltar las aportaciones singulares. (L. A.)

Matemática moderna

Concepto e historia

SCENES FROM THE HISTORY OF REAL FUNCTIONS, por Fydor A. Medvedev. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1991.

Constituye, esta obra, un intento muy valioso de esbozar la historia de la Teoría de funciones de una variable real, trabajo que se encuadra en lo que algunos historiadores americanos califican de 'historia de la matemática moderna', dado que su tema de trabajo es el de historiar una disciplina matemática muy reciente; en este caso, la surgida a fines del siglo XIX y mantenida des-

de entonces. A pesar de ello, y como el autor reconoce, esta obra no cubre el total de la materia y, de aquí, que se pretenda acoger la misma bajo el epígrafe de ensayos, cada uno en forma de capítulo, y son cinco.

En el primero se precisa el origen de la Teoría de las funciones de una variable real, que surge en estrecho enlace con la Teoría de conjuntos, en las postrimerías del siglo pasado. En gracia a las delimitaciones, el autor compara esta teoría con el Análisis clásico y con el Análisis funcional, el surgido a partir de los años treinta. Es un capítulo, realmente, de definiciones conceptuales más que históricas y en el que se establecen las diferencias tanto de método como de contenido entre las teorías citadas, a pesar de que los enunciados de sus contenidos parezcan iguales.

Distinción conceptual que vendrá avalada en el segundo capítulo mediante un recorrido, esta vez histórico, por el concepto clave de 'función', después de haber dado los diversos tipos de definición de este término. Este recorrido conduce a la caracterización de función de Bernoulli-Euler, tras una mención a este término en Newton, de Euler-Dirichlet y al enfoque de función como serie de potencias, o función analítica, para alcanzar, finalmente, la caracterización teórico-conjuntista de Dedekind, que es la que, en el fondo, permite crear la Teoría de funciones de variable real. El autor observa cómo, en el caso de Dedekind, el origen del concepto 'función' puede venir ligado a elementos de carácter más algebraico y de teoría de números que al del Análisis clásico. Sin embargo no tiene presente el posible papel que la Geometría proyectiva, con sus principios de proyección, transformación y dualidad, puedan haber tenido en la cristalización del nuevo concepto.

El autor, consciente de su limitación, hace referencia al posible papel de otras teorías, en concreto al Análisis de variable compleja, y reconoce la necesidad de nuevos estudios que traten de desentrañar la complejidad de relaciones que se enlazan en estos campos, en especial entre conceptos como los de regulabilidad y la noción de función, con los de ley y ley de la naturaleza...

Los tres capítulos o ensayos siguientes se van a centrar no tanto en el aspecto conceptual cuanto en el aspecto analítico o desarrollo interno puramente matemático, aunque la elección de los temas viene subtendida por la previa aclaración conceptual que es la que viene a señalar, fundamentalmente, las diferencias entre el Análisis clásico y la Teoría de funciones de variable real.

El capítulo tercero se centra en uno de los campos de interés básico del Análisis clásico y su inversión transformadora en la Teoría de funciones: la convergencia de series y, en paralelo, los problemas de sumabilidad de series y sucesiones; problemas estos últimos que conducen a admitir las series divergentes que se estimaban, desde el Análisis clásico y con palabras de Abel, una invención del diablo. El autor comienza señalando el enfoque de la representación analítica para centrarse en el tema de la convergencia uniforme de sucesiones de funciones. Tema en



Niels Henrik Abel (1802-1829)

el que, de modo histórico, encuentra que, frente a lo que se viene afirmando en muchos libros de texto al uso, hay varias formas de convergencia uniforme y no todas ellas equivalentes entre sí. En un primer momento, y siguiendo a Hardy, se encuentra que hay una convergencia uniforme en un intervalo, en el entorno de un punto, en un punto; y que la primera implica la segunda y ésta la tercera, pero no a la inversa, salvo manejar el Axioma de elección. A pesar de que la convergencia proceda de Cauchy, será a Weierstrass a quien corresponda manejar la convergencia uniforme por vez primera, aunque será en el terreno de las series trigonométricas donde se alcanzará su máxima tensión con los trabajos de Heine, Cantor —que operan con la primera acepción—, Seidel —que maneja la segunda—... De modo inmediato, en los trabajos del matemático italiano Dini las tres acepciones de convergencia uniforme anteriores se transforman al exigir que se cumpla no para todos los naturales sino para todos los mayores que uno previamente dado. Lo cual conduce a la convergencia cuasi-uniforme y, de paso en paso, a la convergencia en funciones medibles.

Un capítulo amplio que culmina con la clasificación de Baire y que prepara, realmente, al cuarto, donde el autor establece las relaciones entre las operaciones de diferenciación e integración. Para el Análisis clásico, la operación central es la de diferenciación, quedando subordinada a la misma la integral. En Teoría de funciones de una variable real ambas operaciones se muestran en pie de igualdad pero, como indicará acertadamente Medvedev, inclinándose por considerar la integración como la operación base. Es proceso histórico en el que destacan autores como Fréchet, Lebesgue y donde un teorema como el de Radon-Nikodym muestra un papel esencial.

El último capítulo se centra en el estudio y papel de las funciones continuas no diferenciables, consideradas 'patológicas' cuando hacen su aparición en el siglo XIX y que, como agudamente puntualiza el autor, habría que invertir en cuanto a tal consideración, ya que el conjunto de funciones continuas diferenciables es el realmente 'pequeño' en cuanto a su medida y, consecuentemente, es él el patológico.

La obra termina, además de con el índice de nombres, con una amplia bibliografía de la que el autor señala que la ha manejado en su totalidad, aunque desde 1975 en que fue editada esta obra en ruso hasta el momento actual se han agregado nuevos títulos.

Cabe señalar que este es un libro de historia de la matemática contemporánea realmente valioso a pesar de las inevitables lagunas, algo que el propio autor reconoce. Y lo es tanto por su dominio matemático —es una historia matemática de la matemática— como por su enfoque conceptual y su clara visión de la existencia de unos haceres muy distintos como son el Análisis clásico y la Teoría de funciones de una variable real.

La traducción del texto ruso al inglés, aceptable, con una salvedad: el autor insiste en el término *essays* y el traductor lo convierte, en el título, en *Scenes*. (J. L.)

Apuntes

En el curso bajo del Amazonas ha aparecido el yacimiento más antiguo de restos cerámicos del Hemisferio Occidental. Con ello se ha puesto en cuestión la tesis defendida hasta ahora según la cual la selva tropical del Pleistoceno tardío no era lugar indicado para poblaciones sedentarias y sí para comunidades pequeñas y cazadoras, de cultura inferior. Los restos, calibrados por radiocarbono, se remontan unos 8000 o 7000 años.

La familia del retinol (vitamina A) crece. Los vertebrados precisan la presencia del retinol para su desarrollo, visión y reproducción. Sirve, asimismo, de precursor para otros derivados suyos que cumplen funciones específicas. Se ha descubierto un nuevo miembro de esa familia, el 14-hidroxi-4,14-retro-retinol, que media en el control del desarrollo de los linfocitos *B* y otras líneas celulares.

Los biólogos gustan de acudir a la metáfora del santo grial de la leyenda artúrica para designar el núcleo de un problema central cuya solución aparece lejana. Se ha vuelto a utilizar para describir la cuestión básica de la embriología de los vertebrados: el organizador de Spemann, que regula la formación del eje de simetría bilateral, de cabeza a cola. Todo indica que Eddy de Robertis, de origen argentino y colaborador de *Investigación y Ciencia*, podría haber recuperado vaso tan preciado: el gen *gossecoid*. Ha corroborado su hipótesis inyectando ARN mensajero de dicho gen en *Xenopus*: se ha formado el eje; mediante radiación ultravioleta, que bloquea la actividad del eje en los embriones, ha comprobado que se suspende también la actividad de *gossecoid*.

El naturalista sabe que lo pequeño es hermoso. Lo diverso, también. Polarizados los esfuerzos conservacionistas en salvar hábitats (marismas, cursos fluviales, tablas o bosques mediterráneos), suele pasarse por alto que, muchas veces, la amenaza real viene de las propias especies. La introducción en el último tercio del siglo pasado, con fines culinarios, de una carpa euroasiática en los estanques americanos acabó con muchas especies endémicas, además de ser hoy plato menospreciado en la mesa. La historia contemporánea está llena de ejemplos similares —aves, bivalvos, plantas ornamentales y de cultivo— que arrasan allí donde se las ha trasplantado; la última, el jacinto azul, que, importado de Sudámerica, se está enseñoreando de las aguas de Florida.

Por otros motivos, de la mesa están desapareciendo también las setas. En los Países Bajos, cuentan los registros de 1912 a 1954, había 71 especies edibles; los inventarios de 1973 a 1982 rebajaban esa cifra a 38. Caídas que se han corroborado en Inglaterra, Alemania, Austria, Checoslovaquia, Polonia y Hungría. La pérdida no se limita a la diversidad. Algo está ocurriendo con la asociación hongo-especie arbórea. Lo normal es que, cuando un árbol envejece, una especie de hongo deje el sitio a otra. Pero los árboles comienzan a envejecer más deprisa, a un ritmo que no pueden acompasar los hongos.

La ciudad antigua de Jerusalén disponía de un solo manantial, externo, para su abastecimiento, el de Geón. Un sistema de canalización subterránea, que citan los textos bíblicos, permitía a los habitantes de la ciudad de David hacerla llegar durante los episodios de asedio. Ese sistema subterráneo se descubrió a comienzos del siglo pasado. Había tantos errores de bulto en su ingeniería que los arqueólogos dudaron siempre de que llegara realmente a servir. Las incógnitas las ha despejado el estudio de la geología del subsuelo: la red hidráulica aprovechaba la geomorfología kárstica del terreno dolomítico; era, pues, una obra de adaptación a los canales y pozos propios del terreno, no una obra de nueva planta. Se especula ahora que David tomó la ciudad a los jebusitas aprovechándose del conocimiento de esos pasos subterráneos.

¿Rabia en el siglo XX? Ventinueve personas murieron en 1990, en un plazo de cuatro meses, en dos pueblos del alto Amazonas peruano. Los agentes transmisores fueron murciélagos vampiros (*Desmodus rotundus*), el principal reservorio del virus de la rabia en América del Sur. La solución, proponen los expertos para el caso de los pueblos que viven aislados y expuestos a esos animales, no vendrá tanto de la vacuna antirrábica cuanto de otro medio más sencillo: higienizar la región mordida con jabón y prevenir las estancias con mosquiteras.